

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování



Návrh řešení zkušebny výrobní linky

**Suggestion of Production Line Test
Room Solution**

Student: Bc. Petr Cais

Vedoucí práce: Dr. Ing. Jaroslav Melecký

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Cais**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Návrh řešení zkušebny výrobní linky**
Suggestion of Production Line Test Room Solution

Zásady pro vypracování:

V podmínkách vybraného provozu zpracujte návrh řešení zkušebny výrobní linky.

V rámci řešení zpracujte:

- analýzu dané problematiky
- popis výroby, montáže a zkoušení asynchronního generátoru
- uspořádání montážní linky
- návrh přípravků na meziperační manipulace
- logistiku navážení materiálu při dvousměnném provozu
- možnosti diagnostiky generátoru s návrhem způsobu měření a jeho vyhodnocením
- součástí práce bude nutná výkresová a technická dokumentace

Bližší specifikaci potřebných technických údajů provede firma ESPO, s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAVLÍČEK J. a kol. *Provozní spolehlivost strojů (2. přepracované vydání)*. Praha, SZN 1989. 616 s. ISBN 80-209-0029-2.

ZIEGLER, J., HELEBRANT, F. *Technická diagnostika výrobních zařízení*. VŠB Ostrava, 1992. 175 s. ISBN 80-7078-111-4.

Podkladové materiály a technická dokumentace firmy ESPO, s.r.o.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174s., ISBN 80-901-36-1-7.

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost – II. vibrodiagnostika*. VŠB-TU Ostrava 2004, 178 s. ISBN 80-248-0650-9.

<http://cs.wikipedia.org>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Dr.Ing. Jaroslav Melecký**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

Bc. Petr Cais

Adresa:

Závodí 1834

74401 Frenštát pod Radhoštěm

Poděkování:

Touto cestou bych chtěl poděkovat Dr.Ing. Jaroslavu Meleckému za vedení mé práce a cenné připomínky.

Také děkuji prof. Ing. Jiřímu Tůmovi, CSc. a Ing. Jaroslavu Losovi za pomoc s měřeními a zpracováním dat.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CAIS, P. *Návrh řešení zkušebny výrobní linky*, Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 64 s, Diplomová práce, Vedoucí: Dr. Ing. Jaroslav Melecký.

Diplomová práce se zabývá rozmístěním výroby, montáží, zkoušením, řešením problematiky logistických cest a mezioperační manipulací při výrobě elektrických točivých strojů.

První část se věnuje stávajícímu stavu, přípravě výroby, manipulaci, problematice odpadního tepla ve výrobě a montáži.

Další část práce se zabývá měřením hluku a vibrací na vybraných vzorcích asynchronních generátorů. Dále je zde vyhodnocení naměřených dat a návrh řešení zkoušení.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CAIS, P. *Suggestion of Production Line Test Room Solution*, Ostrava: Department of production machines and design, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB - Technical University of Ostrava, 2011, 64 p., Thesis, head: Dr. Ing. Jaroslav Melecký.

The diploma work deals with location of production, testing, analysis of logistic ways problematic and take down manipulation at electrical rotating machines production.

The first part is addressed to existing state, preparation of production, manipulation, problematic of waste heat in production and assembly.

The next part of the diploma work deals with noise and vibration measurement on selected samples of asynchronous generators.

Further there is evaluation of measured data and proposal of testing analysis.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	10
1 Úvod.....	11
2 Popis asynchronního generátoru	14
2.1 Stator	14
2.2 Rotor	14
2.3 Ložiskové uzly	14
2.4 Kabelová konfekce.....	15
2.5 Spojovací a ostatní drobný materiál.....	15
3 Rozmístění výroby	16
3.1 Stávající stav	16
3.2 Možnosti umístění nové výroby	16
4 Výroba generátoru	18
4.1 Navinutý statorový paket.....	18
4.2 Kostra s vinutím	18
4.3 Příprava rotoru	19
4.4 Ložiskové štíty a víka.....	19
4.5 Montáž.....	19
4.6 Zkoušení	20
4.7 Balení a expedice	20

5	Chlazení a ohřev komponent	21
5.1	Výměna tepla vodou, test 1	21
5.2	Výměna tepla vodou, test 2	23
5.3	Výměna tepla vzduchem, test 3	25
5.4	Způsob využití odpadního tepla	26
6	Návrh montážní linky	27
6.1	Montáž, varianta 1	28
6.2	Montáž, varianta 2	31
6.3	Montáž, varianta 3	32
6.4	Technologické časy	35
7	Zkoušení elektromotorů a generátorů	41
7.1	Test měření hluku	42
7.2	Test měření vibrací	43
7.3	Výsledky měření	46
7.4	Zkušebna	56
8	Závěr	61
	Literatura	63
	Seznam příloh	64

Seznam použitých značek a symbolů

DE – Drive end, strana pohonu motoru, kde je volný konec hřídele

NDE – Non drive end, druhá strana motoru, která není poháněná

f [Hz] – Frekvence

n – otáčky za minutu

N – počet valivých členů ložiska (kuliček)

f_i [Hz] – frekvence otáčení vnitřního kroužku ložiska

f_o [Hz] – frekvence otáčení vnějšího kroužku ložiska

f_{BPFO} [Hz] – chybová frekvence vnějšího kroužku ložiska

f_{BPFi} [Hz] – chybová frekvence vnitřního kroužku ložiska

1 Úvod

U každého návrhu výrobku, který je určený pro sériovou výrobu, by se mělo už v samotném konstrukčním návrhu uvažovat o výrobě, konzultovat materiálové toky s logistikou, uvažovat o mezioperační kontrole, skladování, montáži, zkoušení výrobku a jeho expedici k zákazníkovi.

Jedná se o výrobu a zkoušení asynchronního generátoru o výkonu 20kW. Provedení asynchronního generátoru je hliníková vodou chlazená kostra v patkovém provedení. Ložiskové štíty jsou vyrobené z hliníku, v nichž je zalit ocelový kroužek pro ložisko. Vnější a vnitřní ložisková víka jsou také z hliníku, ložisko na straně DE (zadní strana) je axiálně pevné, na straně NDE (přední strana) je ložisko axiálně volné. Z vnější strany axiálně volného ložiska jsou umístěné tlačné pružiny pro předepnutí. Připojení asynchronního generátoru je v provedení bez svorkovnice. Na vývody z vinutí je připojen kabel, který je ze strany k zákazníkovi opatřen konektorem pro připojení.

Výrobu asynchronního generátoru můžeme rozdělit na několik částí. Ve výrobě je nutné oddělit především obrábění od procesu navíjení statoru a montáže. Hlavním důvodem je, že při obrábění vzniká prach, který by ve vinutí mohl být příčinou mezizávitového zkratu. Na montáži by zase mohlo dojít ke kontaminaci plastického maziva ložisek a tím ke zkrácení jejich životnosti. Jednotlivé technologické kroky ve výrobě by měly na sebe navazovat s minimální manipulací bez křížení logistických cest pro zásobování materiálem. Z důvodu čistoty není tedy možné soustředit výrobu na jediném místě. Pro montáž je nutné navíc zajistit skladovací místa pro spojovací materiál, kuličková ložiska, kabelovou konfekci a další drobné katalogové díly. Zvolit způsob montáže, montážní palety, válečkové tratě, montážní stoly, manipulační prostředky.

Na zkušebně se nakonec vyzkouší izolační stav, změří se proudy při běhu na prázdko, zkontrolují se otáčky, chvění. Zákazník požaduje také kontrolu hlučnosti generátoru, protože se asynchronní generátor umísťuje v obytných domech. Celé zařízení (obrázek č. 1) se skládá ze spalovacího motoru na plyn, asynchronního generátoru, chladicího systému s oběhovými čerpadly a dálkově ovládané řídicí jednotky. Tento celek pak slouží k okamžitému vyrovnání výpadku dodávky elektrické energie z větrných elektráren nebo z fotovoltaických elektráren. Dálkově se provede připojení zařízení na síť, asynchronní stroj se rozběhne v motorickém stavu a nastartuje spalovací motor. Po nastartování spalovacího motoru a zvýšení otáček nad synchronní se stroj přepne do generátorového režimu a začne dodávat elektrickou energii do rozvodné sítě. Odpadní teplo, které vzniká, se využije k vytápění v instalovaném objektu.



Obrázek 1 Kompletní jednotka s asynchronním generátorem vpravo dole

Po náběhu sériové výroby se počítá s dvousměnným provozem na montáži s roční kapacitou 12000 ks generátorů. Takt montáže a s tím navazující zkušebnou by byl 15 minut. Třetí směna, případně nepřetržitý provoz, bude sloužit jen v případě nutného navýšení kapacity z důvodu výkyvu objednávek, případně při zpoždění dodávky některé z komponent a nakonec i z důvodu výpadku ve výrobě.

Umístění výroby se musí v tomto případě vejít do stávajících výrobních prostorů, přemístěním a úpravou aktuální výroby. Mállokdy se navrhuje výroba do nově postavené haly, kde je možné si uspořádat materiálové toky a rozdělit výrobu podle potřeby. U výroby, kde musíme zachovat i původní sortiment, je nutné postupovat s rozvahou. Původní výroba nesmí být narušená, dojde pouze k jejímu přemístění a uvolnění prostorů pro nové výrobky. U návrhu nové výroby jsme limitovaní prostorem, který je daný rozměry původní haly. Dále jsme také omezeni umístěním nové výroby v hale, protože jsou technologie, které nejde přesunout na jiné místo.

2 Popis asynchronního generátoru

Asynchronní generátor je složený z několika celků a dílů. V tomto případě můžeme generátor rozdělit na stator, rotor, ložiskové uzly, kabelovou konfekci a spojovací materiál.

2.1 Stator

Stator je tvořen hliníkovou kostrou v patkovém provedení a navinutým statorovým paketem. Navíjení statorového paketu je zajištěné v navíjecím souboru. V navíjecím souboru je zajištěno navíjení cívek, zasouvání drážkových a mezifázových izolací, vtahování cívek do drážek statorového paketu, formování čel vinutí a zapojení. Následně se musí provést impregnace vinutí. Připravený naimpregnovaný statorový paket se lisuje do ohřáté kostry a proti pootočení je zajištěn válcovým kolíkem. Na takto připravené kostře s vinutím jsou v následující operaci výroby opracované čelní plochy a průměry pro ložiskové štíty. Kostra je dodávána jako vyhrubovaná s přídavkem 1mm na opracování. Teď máme připravený stator (kostru s vinutím) k montáži.

2.2 Rotor

Rotor je s kotvou nakrátko a skládá se z rotorových plechů s drážkami, rotorových tyčí, rotorového kruhu a hřídele. Na rotoru musí být opracovaný vnější průměr rotorových plechů. Tím vzniká velikost vzduchové mezery, která je přesně stanovená výpočtem při elektrickém návrhu stroje. Velikost vzduchové mezery má vliv na elektrické vlastnosti motoru (generátoru), její asymetrie může způsobovat mimo jiné nežádoucí hluk. Na závěr se musí každý rotor dynamicky vyvážit na vyvažovačce.

2.3 Ložiskové uzly

Ložiskové uzly se skládají z předního (NDE) a zadního (DE) ložiskového štítu. Dále jsou zde vnější a vnitřní ložisková víka. Všechny tyto díly jsou z hliníku. Aby byl výčet kompletní, tak musím ještě uvést kuličková ložiska a sadu tlačných pružin pro axiální předeprnutí ložisek.

2.4 Kabelová konfekce

Asynchronní generátor je v provedení bez svorkovnicové skříně. Na vývody z vinutí je pomocí lisovacích trubek připojený vývodní kabel. Tento kabel je vyvedený přes kabelovou vývodku v kostře ven z motoru. Na straně pro zákazníka se nachází konektor pro jednoduché a rychlé připojení.

2.5 Spojovací a ostatní drobný materiál

Jedná se o všechny šrouby, které upevňují ložiskové štíty na kostru, ložisková víka k ložiskovým štítům, zemnicí šrouby. Domazávací hlavice, plastické mazivo pro ložiska a také pojistné kroužky ložisek. Pro spojení vývodů z vinutí na kabel potřebujeme lisovací trubky a izolační materiál. Všechn tento materiál společně s kabelovou konfekcí je potřeba připravit pro montéry na montáž.

3 Rozmístění výroby

3.1 Stávající stav

Současná výroba je rozdělená do dvou hal. V jedné se nachází mechanická obrobna dílů včetně svařovny, pracoviště vyvažování a skladů litiny. Tato hala má pouze jedno nadzemní podlaží, její označení je U17 (Příloha A). Je zde také stavebně oddělená hlavní zkušebna elektromotorů. Ve druhé hale (Příloha B) v prvním nadzemním podlaží je dílna pro navíjení statorů a rotorů, vakuová impregnace, montáž, lakovna a expedice. Nachází se zde také několik regálů s díly pro montáž a s obalovým materiálem pro expedici. Ve druhém nadzemním podlaží jsou sklady a kanceláře. Označení této budovy je U18.

3.2 Možnosti umístění nové výroby

Nejvhodnějším umístěním navíjení, montáže a zkušebny výrobní linky je v budově U18, kde není mechanická obrobna. Montáž nebude v prašném prostředí a zkušebna by navazovala přímo na montáž. Znamená to přesunutí některých technologií, případně jejich koncentraci na jiném místě, aby se získal prostor pro novou výrobu. Rozteč mezi podpěrnými sloupy v této hale je 6 metrů. Volba budovy U18 má také opodstatnění v navážení materiálu a v expedici hotových výrobků. Tato budova má průjezd na vnější rampu, kde je v současné době místo pro dva kontejnery. Vně budovy u vnější rampy je dostatečný prostor pro další kontejnerová místa. V přistavených kontejnerech je možné částečně řešit skladování komponent, které budou určeny přímo k použití na montáži, případně v procesu navíjení. Také je vhodné hotové výrobky, které jsou po zabalení určeny k expedici, průběžně navážet do prázdného kontejneru. Tento kontejner by po naplnění mohl být okamžitě odvezen přímo k zákazníkovi.

V budově U17, ve které je v současné době umístěná obrobna, je potřeba zajistit výrobu rotoru a dalších mechanických komponentů (ložiskové štíty a víka). Protože existuje i nabídka na kompletně opracované ložiskové štíty a víka, tak se nabízí i varianta pořízení těchto dílů jako hotových. Tím dojde k ušetření místa pro skladování odlitků před obráběním a sníží se i manipulace s těmito díly.

Z pohledu logistiky a logistických cest je potřeba najít nejlepší řešení pro navážení materiálu. Minimalizovat manipulaci s materiálem, rozmístit výrobu tak, aby nedocházelo ke křížení logistických cest. Pokud přepravujeme pomocí vysokozdvizného paletového vozíku, tak umístit pokud je to možné materiál na místo, odkud se bude přímo odebírat pro výrobu. Problém nastává při využití skladovacího místa v přistavených kontejnerech, v nichž se materiál zároveň přiváží do firmy. V zimním, případně letním období je nutné vyskladnit materiál určený do výroby s předstihem z důvodu rozdílných teplot. Dílce se musí natemperovat na požadovanou teplotu. Takže bude nutné vyřešit částečné skladování před použitím dílců ve výrobě.

Při soustředění celé výroby nového produktu (navíjení, obrábění, montáž, zkušebna, expedice) do jedné haly by přineslo výhodu v centrálním umístění. Vzdálenost pro manipulaci mezi pracovišti by byla zanedbatelná. Předávání dílců by mohlo být provedeno pomocí dopravníku, případně jednoduchými otočnými jeřáby. Výhoda by byla v návaznosti jednotlivých operací a tím zkrácení průběžného času výroby. Nicméně takové řešení není optimální z důvodu zajištění čistoty na montáži. Bylo by více obráběcích míst, která by se musela zajistit proti úniku prachu. Další nevýhoda by byla ve vytvoření jednoúčelové výroby. V pozdější době, při získání další zakázky v podobném objemu, by bylo problematické dostat do takové uzavřené výrobní linky jiný produkt. Některé výrobní stroje nemusí být schopné výroby druhého produktu, přestože montáž a zkušebna by neměla žádný problém s jiným typem elektromotoru (generátoru). Muselo by se řešit, jak dostat jiné komponenty do výrobního procesu, některé výrobní technologie vynechat, jiné zajišťovat zpátky na mechanické obrobně. Stejně tak závada na kterémkoli obráběcím stroji by způsobila zastavení celé výroby včetně montáže.

4 Výroba generátoru

4.1 Navinutý statorový paket

Navinutý statorový paket je tvořen ze statorového paketu, který je složen z jednotlivých plechů, izolací, cívek a impregnace. Celý proces navíjení bude zajištěn nákupem navíjecího souboru od firmy Risomat. Vodiče se budou nakupovat na velkých cívkách (cca 70 kg vodiče v jedné cívce). V navíjecím souboru bude nejdříve probíhat navíjení jednotlivých cívek podle elektrické specifikace. Na šablony se natočí potřebné množství závitů. Takto připravené cívky se budou postupně vtahovat do drážek statorového paketu, do nichž bude předem zasunutá drážková izolace. Po vtažení všech cívek do paketu se musí do čel vinutí vložit izolace pro oddělení jednotlivých fází a do drážek zasunout uzávěry. Uzávěr drážky zabraňuje jednotlivým vodičům vypadnout z drážky. Výroba bude pokračovat na pracoviště zapojení vývodů, kde se jednotlivé vodiče cívek zapojí do vývodu pro připojení kabelu na montáži. Na závěr výroby navinutého statoru se naformují čela vinutí a odzkouší se před impregnací. Po impregnaci je jakýkoliv zásah do zapojení vyloučený. Impregnace se provádí vakuově, s následným vytvrzením v peci. Kvalita impregnace zásadně ovlivňuje kvalitu izolačního stavu a také oteplení stroje. Šetřit na množství impregnačního laku nebo na nedodržení technologického postupu pro namáčení a vytvrzování se nevyplatí.

4.2 Kostra s vinutím

Po vytvrzení impregnačního laku následuje operace nalisování navinutého statorového paketu do kostry. Kostra se musí předeřhát, aby vznikla vůle mezi kostrou a paketem. Po vyrovnání teplot se provede zakolíkování válcovým kolíkem. Protože se jedná o vodou chlazený stroj, provádí se tlaková zkouška chladicího okruhu. Zkontroluje se těsnost pláště a připojených odvodušňovacích a vypouštěcích ventilů. Pokračuje se na dalším pracovišti obráběním průměrů a čelní dosedacích ploch pro ložiskové štíty. Touto operací získáme kostru s vinutím, která je připravená na montáž, kde bude následovat spojení s vývodním kabelem.

4.3 Příprava rotoru

U rotoru se zmíním pouze o výrobě hřídele a o vyvažování. Hřídel se soustruží na požadovaný rozměr a po nalisování rotorové klece (za tepla) se provede opracování vzduchové mezery. Vyvažování se provádí odebíráním materiálu z vyvažovacích kruhů. Odebírání materiálu byl požadavek zákazníka. Na přípravu rotoru potřebujeme tedy pracoviště obrábění hřídelů, lisování rotorové klece, obrábění vzduchové mezery a vyvažování. O výrobě rotorové klece a jejím provedení se v současné době nepodávají žádné informace, musíme vystačit s tím, že se jedná o asynchronní stroj s kotvou nakrátko.

4.4 Ložiskové štíty a víka

Ložiskové štíty a víka jsou hliníkové odlitky s přídávkem 1mm na opracování. Tyto díly se buď opracují na mechanické obrobce v budově U17 nebo se zajistí nákupem jako hotové výrobky.

4.5 Montáž

Montáž je vhodné rozdělit na několik dílčích operací. Začne se pracovištěm svorkování, kde pracovník provede spojení kabelu s vývody z vinutí. Spoj je proveden pomocí lisovací trubky, kde z jedné strany je vývod z vinutí a z druhé strany je jeden vodič kabelu. Tento spoj musí být následně zaizolován pomocí izolačních trubek. Kabel je vyvedený přes stíněnou kabelovou vývodku ven z kostry. Mimo připojení fázových vodičů se na stejném pracovišti připojí i zemnicí vodič pomocí kabelového oka na zemnicí šroub.

Na mechanické montáži se udělá jako první krok příprava rotoru. Jedná se o nasazení vnitřních ložiskových vík a obou ložisek. Ložiska jsou oboustranně otevřená a nakupují se od výrobce s požadovaným plastickým mazivem. Takto připravený rotor je možné vložit pomocí přípravku do kostry s vinutím. Zároveň je nutné nachystat ložiskové štíty. Musí se provést kontrola čistoty domazávacích kanálů a naplnit je předepsaným plastickým mazivem. Ložiskové štíty nasunout na ložiska a kostru, upevnit šrouby, které se dotahují předepsaným momentem pro daný rozměr. Zbývají už jen vnější ložisková víka a vnější zemnicí svorka.

U pracovišť montáže je potřeba vytvořit dostatek prostoru pro všechny komponenty a zachovat zároveň přístup pro navážení palet s materiálem.

4.6 Zkoušení

U výroby sériových provedení je nejvhodnější, pokud zkušebna přímo navazuje na montážní linku. Na asynchronním generátoru se nejdříve zkouší izolační stav proti kostře vysokým napětím a změří se odpor jednotlivých fází. Stroj na zkušebně se nechá plynule rozběhnout na předepsané otáčky. Počká se na promíchání a rozdělení plastického maziva v ložiscích. Pak se pokračuje změřením proudů naprázdno a dle požadavku zákazníka se ověří hlučnost generátoru. Celá zkouška nesmí trvat déle než je takt montážní linky. Na generátor se připevní všechny potřebné štítky včetně výkonnostního a provede se poslední kontrola výrobku, např. krytky domazávacích hlavíc, nepoškozenost kabelu, aj.

4.7 Balení a expedice

Ze zkušebny se stroj přemístí na přepravní podložku a paletu. Provede se zapáskování, zakrytí volného konce a pak i celého stroje. Na jedné europaletě jsou umístěny dva generátory. Takže při počtu 50ks za den, se musí nachystat a naložit 25 palet. Po zabalení se paleta odveze do přistaveného kontejneru, který je určen pro expedici.

5 Chlazení a ohřev komponent

Protože v různých fázích výroby dojde z důvodu technologického procesu k zahřátí komponent a v následujícím kroku je nutné, aby měly zase teplotu okolí. Čekání a skladování rozpracované výroby tím jen prodlouží průběžný čas výroby a tím i zvýší hodnotu dílců v rozpracované výrobě. Pokud se bude čekat na ochlazení 24 hodin při teplotě okolí 20°C, znamená to, že celou denní dávku je nutné někde naskladnit. Tyto dílce zároveň v letních měsících budou nežádoucím způsobem ohřívat okolní vzduch v hale. Jedná se o tyto operace, po kterých je nutné počkat na ochlazení dílců:

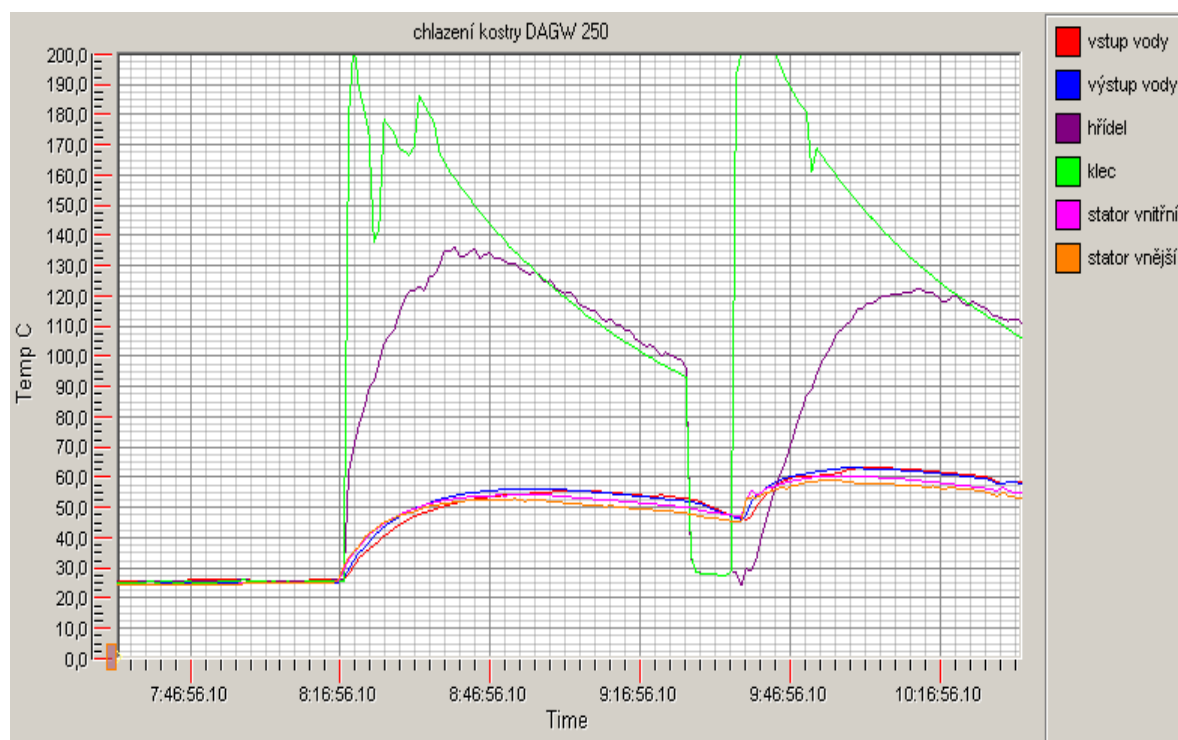
- vypékání impregnačního laku
- rotor po nalisování rotorové klece
- kostra po nalisování statorového paketu

V jednom případě je nutný ohřev a to je při operaci lisování statorového paketu do kostry. Kostru je potřeba ohřát, zatímco statorový paket je po předchozí operaci (vypékání impregnačního laku) horký. Takže se hledá cesta, jak ochladit horké dílce a teplo předat ve výrobním procesu tam, kde jej zase potřebujeme. Za tímto účelem bylo provedeno několik testů. Vždy se ochlazoval rotor po nalisování rotorové klece a prováděl se ohřev kostry.

5.1 Výměna tepla vodou, test 1

Pro první test se vytvořil měděný dvouplášťový chladič. Jedna část byla nasazená na rotorovou klec a druhá na hřídel ze strany DE. Do okruhu se zapojilo oběhové čerpadlo, vyrovnávací nádrž a kostra elektromotoru. Celý testovací systém byl naplněn vodou.

Na obrázku č. 2 je vidět, že po třiceti minutách dosáhla teplota kostry nejvyšší hodnoty 55°C. Potom začala teplota pomalu klesat. Při nasazení nového horkého rotoru se podařilo předejřátou kostru ohřát jen na 60°C. Tento test byl proveden přímo v prostoru dílny, takže teplo se vyzařovalo do okolí. Skokové změny teploty na rotorové kleci jsou způsobené upevněním teplotního snímače, v dalších pokusech se problém již neopakoval. Jakmile došlo k vyrovnání teploty hřídele a rotorové klece, tak začala klesat teplota kostry. Proces chladnutí kostry probíhal i přesto, že teplota rotoru byla ještě 120°C. Ani pomocí regulace průtoku vody v soustavě se nepodařilo nijak ovlivnit výměnu tepla.



Obrázek 2 Graf výměny tepla z rotoru do kostry

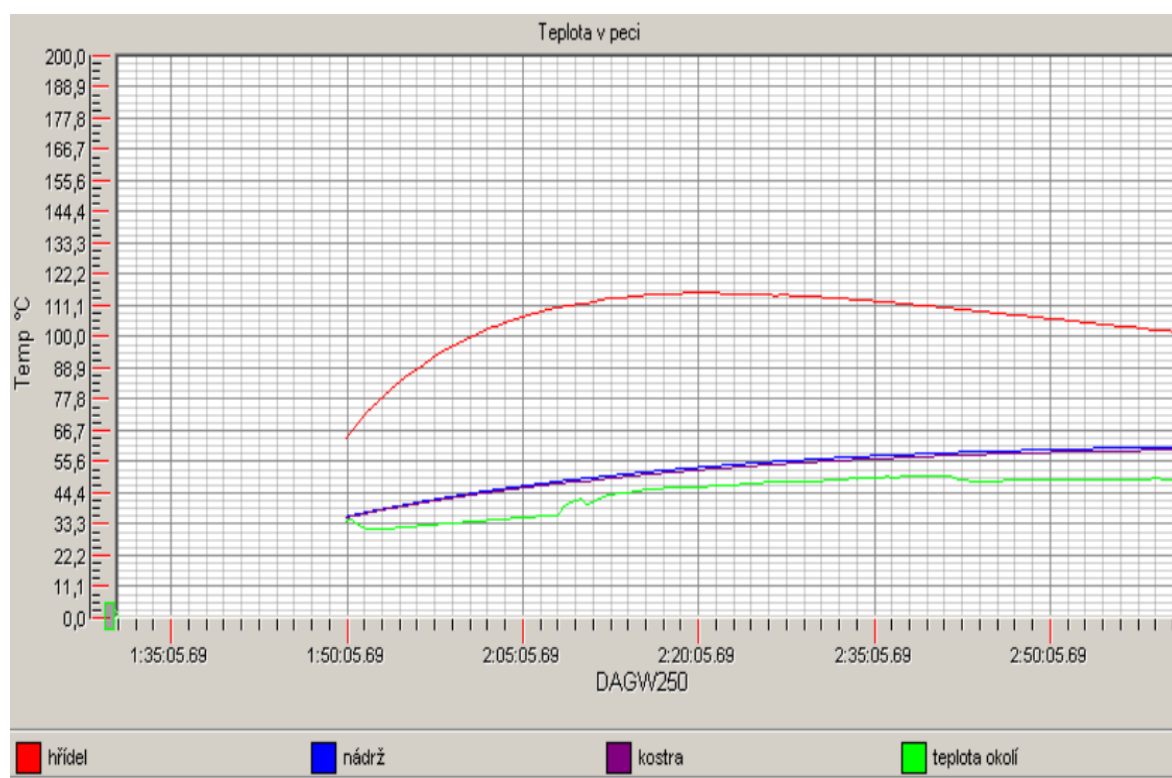
5.2 Výměna tepla vodou, test 2

Ve druhém testu se celé zařízení umístilo do dřevěné bedny, která měla na vnitřní straně tepelně odrazivou plochu. Celé testovací zařízení, kromě uzavíracího víka, je vidět na obrázku č. 3. Uzavírací víko bylo také opatřené stejnou tepelně odrazivou plochou jako stěny a dno.



Obrázek 3 Pokusné testovací zařízení pro výměnu tepla

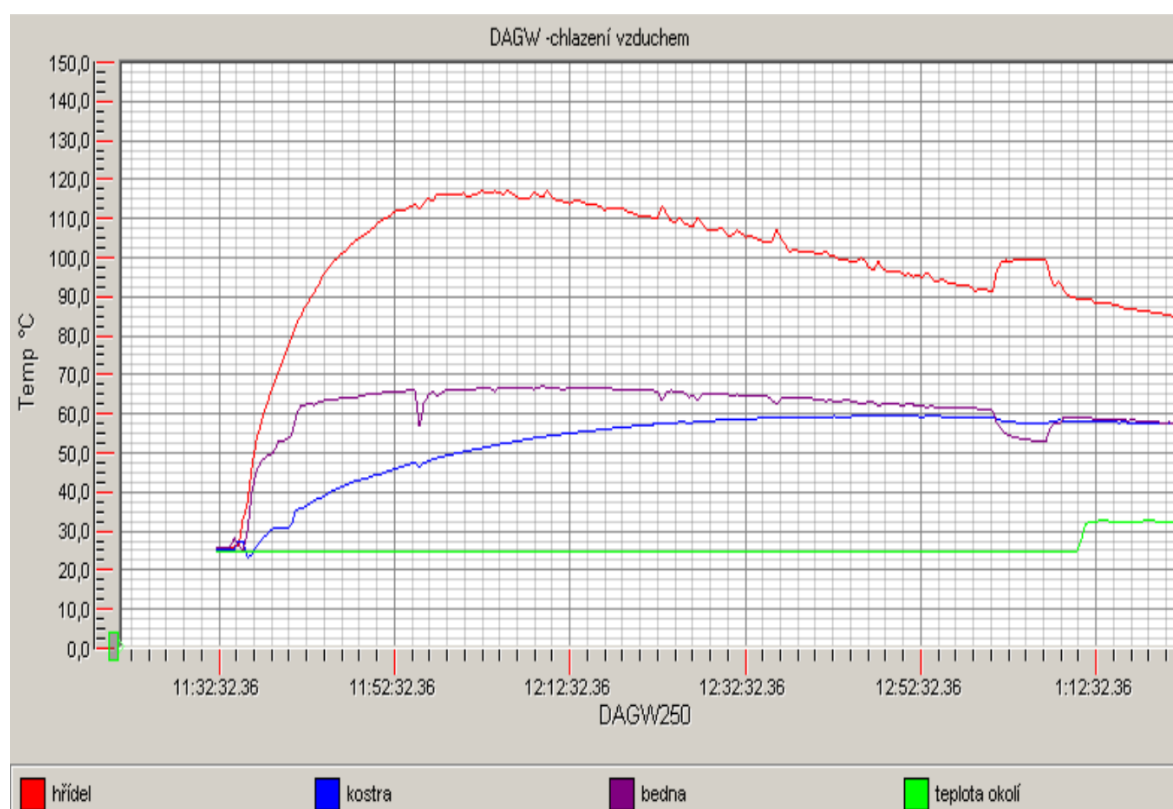
Podařilo se zamezit úniku tepla do okolí, nicméně maximální teplota kostry dosáhla 60°C. Průběh teplot je na obrázku č. 4. Z hlediska manipulace a nutnosti propojování pomocí hadic, je toto řešení momentálně špatně využitelné do praxe. Na rychlé spojení je třeba využít rychlospojky na spojovacích hadicích. Na kostru pak našroubovat redukce, na které se připojí rychlospojky. Po zkušenostech z prvního a druhého testu a při vylepšení tohoto systému je odhadovaná teplota, na kterou by se podařilo ohřát kostru, tak asi 65°C. Dalších 5°C se dá získat dodatečnou vnitřní a vnější izolací kostry. Tu by ale bylo nutné při manipulaci sundat. Využití vody pro ochlazení rotoru a ohřátí kostry statoru tedy momentálně nevyužijeme. Tento systém je výhodný pro kontinuální provoz, protože na začátku směny je celý systém chladný a je potřeba minimálně jednoho cyklu pro ohřátí vody v okruhu.



Obrázek 4 Graf výměny tepla v izolované soustavě, médium voda

5.3 Výměna tepla vzduchem, test 3

Poslední test se provedl ve stejném boxu, jako druhý pokus. Pouze se demontovalo celé zařízení pro oběh vody. Dovnitř byl umístěný malý ventilátor tak, aby vzduch mohl proudit přes rotor do kostry. Vzhledem k pomalé výměně tepla pomocí vzduchu, dostali jsme se na maximální teplotu 60°C až za 70 minut. Jeden teplotní snímač byl umístěn na měření teploty okolí. Ke konci testu se toto čidlo připevnilo na vnější plášť boxu, je to vidět teplotním skokem na zelené křivce (obrázek č. 5). Stejně tak byl proveden pokus s vypnutím ventilátoru, kdy se okamžitě začala zvyšovat teplota hřídele a snížila se naopak teplota uvnitř boxu. Tato změna je zaznamenána na průběhu teplot ke konci záznamu. Nicméně, tento pokus se jeví jako lépe využitelný v praxi. Je možné vyrobit malou pec, kde by zdrojem tepla byl horký rotor. Uvnitř by se vertikálně umístila kostra a dovnitř kostry rotor. Nahoru tohoto boxu by se dal ventilátor, kterým by se vytvořila nucená cirkulace vzduchu.



Obrázek 5 Graf průběhu výměny tepla pomocí vzduchu

5.4 Způsob využití odpadního tepla

Vzhledem k rozmístění výroby, kde nebude s největší pravděpodobností výroba rotoru a statoru v jedné hale, je nejlepší možnost využití odpadního tepla pro ohřev teplé užitkové vody v zásobnících. V místech, kde potřebujeme ochladit tyto komponenty, vybudovat uzavřený dopravník. Z prostoru tohoto dopravníku, pomocí tepelného čerpadla typu vzduch-voda, odebírat teplo a tím ochlazovat dílce uvnitř. Tento způsob bude za daných podmínek nejlépe využitelný v praxi. Pokud by se podařilo takovým způsobem ochladit statorový paket a rotor během jedné směny, tak je to dobrý začátek pro zkrácení průběžného času výroby. Také ušetření skladovacích prostor, které by byly nutné v případě uložení na 24 hodin, je přínosem pro firmu. Při případném zavedení třetí směny, by bez chlazení nastal problém s množstvím materiálu v rozpracované výrobě a s jeho skladováním.

6 Návrh montážní linky

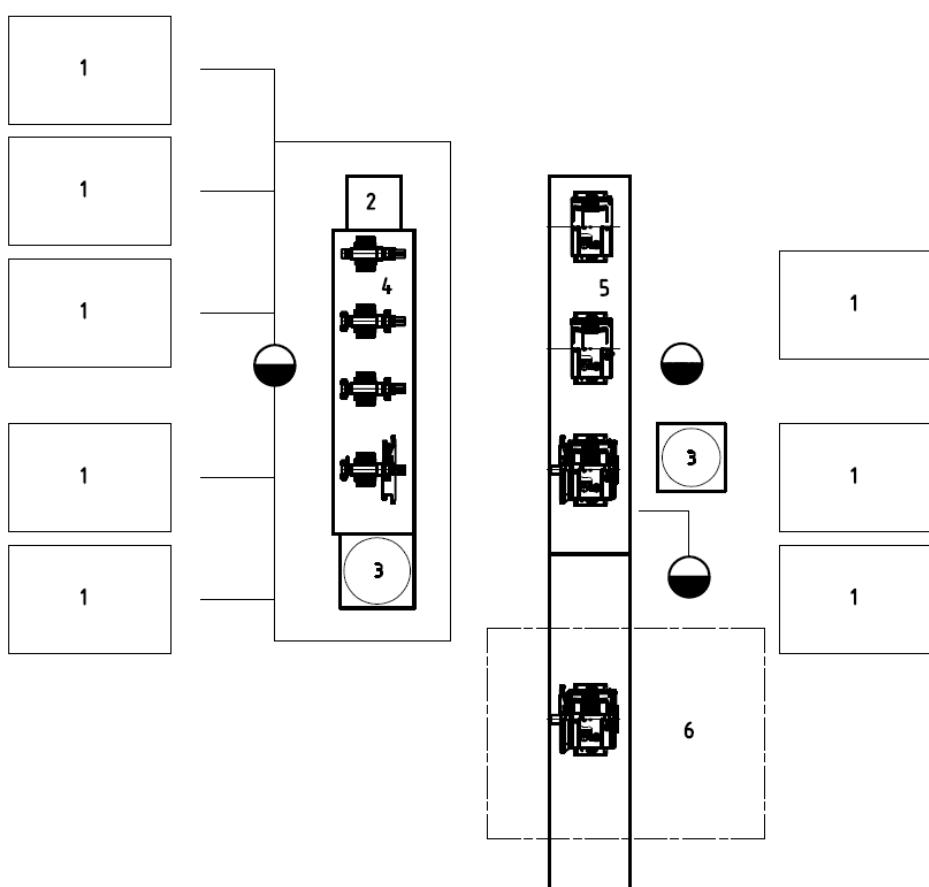
Montovat asynchronní generátory je v zásadě možné dvěma způsoby. Jedna možnost je rozdělit operace a vše provádět na pracovních stolech. Takové řešení je ale pro výrobní takt 15 minut neřešitelný z pohledu manipulace. Přesouvat rozpracované stroje pomocí jeřábu nebo postavit závěsný dopravník je nevhodné. U takové manipulace hrozí poškození např. zapojeného kabelu. Vznikaly by vícenáklady na opravy poškozených výrobků. Také by docházelo k prostojům, protože posun by se musel provádět od poslední operace postupně až po první, tak jak by se uvolňovala jednotlivá pracoviště. Zavěšování na jeřáb je zároveň zdoluhavé, protože břemeno se musí nejdříve zavěsit, pak zvednout, přemístit na novou pozici, položit a nakonec sundat ze závěsu. Připočítává se také nutná doba pohybu jeřábu bez břemene. Při takové organizaci výroby by nás stálo spoustu času manipulování s jeřábem. Byl by to neproduktivní čas, který by se nutně promítnul do celkového taktu výroby, nebo by to znamenalo mít jednoho pracovníka na mezioperační posun výrobku. V obou případech by se jednalo o zdražení výrobních nákladů.

Jako druhé řešení je použití dopravníku a montované stroje umístit na montážní paletu, s níž se budou posouvat mezi operacemi. Dopravníků je celá řada, od pásových, válečkových, kuličkové stoly, kluzné. Pásový dopravník má výhodu v jednom centrálním posunu výroby podle taktu linky. Nicméně může nastat situace, kdy na některém z pracovišť nastane problém při montáži. Montáž se prodlouží o pět minut na jednom konkrétním výrobku a všichni kolem pásového dopravníku musí čekat. Výhodnější je posun po válečkové trati. Z pracoviště, kde bude mít splněné všechny předepsané operace, provede nezávisle posunutí výrobku k dalšímu pracovníkovi. Protože jsou mezi jednotlivými pracovišti rozestupy, tak aby měl každý pracovník dostatek místa pro provedení svých montážních úkonů, může být stroj posunut zatím do prostoru mezi dvěma montážními operacemi. Na další pozici v lince si jej pak posune pracovník, který je na daném pracovišti ve chvíli, kdy bude mít ukončené všechny operace z předchozího výrobku. Při nějakém výpadku nebo problému je možné nezávisle posouvat ostatní výrobky. Nedojde tak k prostoji na celé montážní lince jako v případě pásového dopravníku, ale jen u následujícího pracoviště. Využití kuličkového dopravníku má nevýhodu i v možnosti posunu ve směru kolmo na osu dopravníku. Při některých montážních operacích je takový posun nežádoucí. Znamenalo by to navíc další manipulační a finanční prostředky, které by výrobu jen zdržovaly a prodražovaly.

6.1 Montáž, varianta 1

První varianta montáže (obrázek č. 6) se vyznačuje rozdělením na dva souběžné celky:

- předmontáž rotoru (ložiska, ložisková víka)
- montáž (svorkování, ložiskové štíty)



Obrázek 6 Uspořádání montáže podle první varianty:

1-palety; 2-ohřev ložisek; 3-ohřev ložiskových štítů;

4-předmontáž rotorů; 5-montáž; 6-zkušebna

V prvním návrhu je celá výroba situovaná do tří lodí (Příloha C). Navíjecí soubor je ve třetí lodi a vedle něj, na pravé straně, zůstává k dispozici manipulační ulička. Tento manipulační prostor zůstane pro možnost navážení materiálu pro původní výrobu. Další manipulační prostor pro původní výrobu zůstane mezi vnější stěnou a navíjecím souborem. Souběžně s navíjecím souborem ve druhé lodi je pásový dopravník pro přepravu koster na operaci lisování statorového paketu do kostry. Tímto řešením dojde k využití prostoru ve druhé lodi, ve které se provádí výroba kompletního statoru. V první lodi je situovaná výroba rotoru. Nevýhodou tohoto uspořádání je jeho uzavřenost pro jiný sortiment. Pokud by měla být rozšířená výroba o jiný produkt, který by u některé operace použil jinou technologii, tak by nastal problém s vytížením některých pracovišť. Zároveň by bylo nutné dostat z jiného místa ve výrobě produkt tak, aby plynule navazovala výroba. Po skončení některých operací, je nutné některé komponenty ochladit na okolní teplotu. To vyžaduje buď nějakou formu chlazení nebo odkládací prostor.

Výroba navinutého statorového paketu by začala v blízkosti vstupu do haly. Na začátek by bylo možné bez problémů navážet statorové plechy, vodiče na navíjení cívek a materiál na izolace. Tento vstupní materiál je možné vyskladňovat přes rampu přímo z přistaveného kontejneru.

Největší díl je kostra motoru. Předpokládá se přeprava 6ks koster na jedné europaletě. Opět by se skládala v blízkosti vstupu do haly. Stávajícím jeřábem by proběhla manipulace pomocí přípravku na pásový dopravník. Než se kostra po dopravníku posune na první operaci, tak je dostatek času na vyrovnaní případných teplot v zimním období. Zároveň je vytvořená dostatečná zásoba pro možnost přistavení nového kontejneru s další dávkou koster pro výrobu. Může dojít i ke zpoždění při přepravě materiálu, což může nastat hlavně v zimním období.

Kompletní kostra s vinutím je manipulována mezi jednotlivými operacemi pomocí jednokolejné závěsné dráhy. Otevřená zůstává manipulace na operaci obrábění kostry. Obráběcí stroj je poptán a řešení manipulace bude provedené až po výběru stroje. Po opracování kompletní kostry se pomocí otočného jeřábu umístí na montážní paletu na začátek montážní linky.

Výroba rotoru začíná na druhé straně haly, než je vstup z rampy. Pro dopravu rotorových plechů se využije stávající manipulační prostor. Jeho celková šířka je 6 metrů včetně připravených třípodlažních regálů. Díly, které se budou kupovat je možné naskladnit do připraveného regálu. Vytvoří se tím opět nutná minimální skladová zásoba. Dílce z obrobny bude možné přivážet druhým spojovacím koridorem, který je mezi halou U17 a U18. Protože se jedná o vlastní výrobu, tak není problém dopravovat materiál dle potřeby přímo z obrobny, tak jak bude vznikat potřeba ve výrobě rotorů. Mezioperační manipulace bude prováděná otočnými jeřáby s pomocí dvojháku. Z poslední operace vyvažování rotoru se dostáváme na předmontáž.

Předmontáž rotorů je řešená souběžně s montáží. Schematické naznačení je na obrázku č. 6. Musíme nejdříve nasadit vnitřní ložisková víka. Následuje ohřev ložisek a jejich nasunutí na hřídel. Dále se ještě nasadí ložiskový štít DE a vnější ložiskové víko. Smontuje se kompletně celý ložiskový uzel strany DE. Všechn materiál, který je nutný k montáži, je možné navážet z levé strany stávajícím manipulačním prostorem.

Montáž začíná první operací a tím je svorkování. Z pravé strany montáže je prostor pro potřebné díly. Kabel se bude nakupovat kompletně s připraveným konektorem pro koncového zákazníka. Ze strany zapojení na vývodní vodiče vinutí bude odizolován a opatřen lisovací trubkou pro provedení spoje s vinutím. Následuje posun na lince k další operaci. Tím je vložení připraveného rotoru do kompletního statoru. K tomu se použije C-hák a otočný jeřáb. Montáž skončí nasazením ložiskového štítu NDE a vnějšího ložiskového víka s pružinami.

Následuje zkoušení, balení a expedice. Protože je balení v blízkosti výstupní brány z haly, tak nebude manipulace do připraveného kontejneru nijak složitá. Dochází zde ke křížení logistických tras a to trasy pro návoz materiálu a trasy pro expedici. Ale protože je plánovaný počet 25 kusů generátorů za směnu ve dvousměnném provozu, tak cyklus navážení materiálu může proběhnout po ukončení druhé směny. To se jedná o nakupované komponenty. Dílce vyráběné na obrobně, je možné dopravovat prvním, případně druhým, spojovacím koridorem.

Nevýhoda tohoto řešení spočívá v uzavřenosti a jednoúčelovosti výroby. Dále v manipulaci rotorů z operace vyvažování na předmontáž. Otočné jeřáby jsou umístěné tak, aby nedošlo k jejich křížení. Tím ale vzniká problém s manipulací rotoru. Jeřáby nemají dosah, a použití skluzu by zmenšilo prostor pro pohyb pracovníka na pracovišti přípravy rotorů. Také provedení operace zasunutí rotoru do kompletního statoru je pomocí otočného jeřábu obtížná. Při zasouvání musíme zároveň otáčet ramenem jeřábu a posouvat v rameni. Tento otočný jeřáb se zároveň využívá jak na manipulaci statoru z poslední operace na montáž, tak i pro montáž motoru a pro balení. Při taktu 15 minut to není problém, ale každý pracovník, který by jej potřeboval, tak by musel obcházet montáž, aby se dostal k ovládnutí. Také mezioperační manipulace potřebuje takovou návaznost, aby nedocházelo k vyjmutí dílce z jednoho stroje a uložení na stůl před další operací. Jedná se o zbytečný čas, kdy musím dílec položit a za chvíli stejným manipulačním zařízením zase vzít a vložit do dalšího obráběcího stroje.

6.2 Montáž, varianta 2

Druhý návrh (Příloha D) má několik odlišností. Vize tohoto návrhu je ve změně manipulace mezi pracovišti. Tento návrh obsahuje:

- prodloužení montážního pásu
- využití montážního pásu pro mezioperační manipulaci
- zrušení souběžné přípravy rotorů (předmontáž)

Prodloužením montážního pásu dojde k jeho využití k mezioperační manipulaci mezi pracovišti. V této variantě je také konkrétněji zapracovaná možnost využití odpadního tepla po impregnaci navinutých statorů a po nalisování rotorové klece na hřídel. Jak navinutý stator, tak neopracovaný rotor je potřeba mít pro další operace ve výrobě ochlazené na okolní teplotu. Tato teplota se využije buď pro ohřev teplé užitkové vody v zásobníku vody nebo nejlépe pro ohřev kostry, do které se lisuje navinutý statorový paket. V této variantě se snačíme o soustředění výrobků, které je nutné chladit, do jednoho místa.

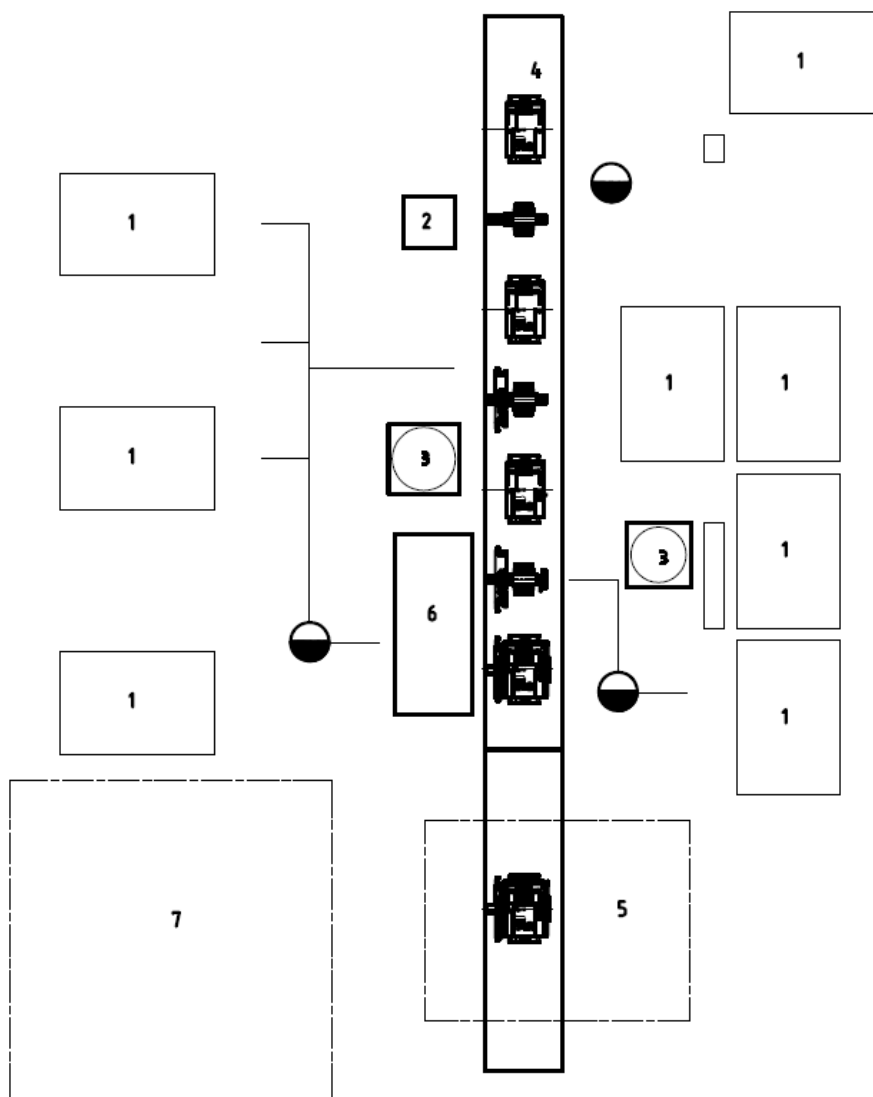
Výroba navinutého statorového paketu bude probíhat, stejně jako v předchozí variantě, ve třetí lodi. Celá výroba stále zůstává uzavřená dalším projektům. Nevýhodou tohoto řešení je, že pokud při výrobě nebo manipulaci dojde k poškození například rotoru, který bude muset být vyřazen z výroby jako neshodný výrobek, tak není místo vyřazeného kusu žádná náhrada. Na dopravním pásu jsou k sobě přiřazeny jak kompletní statory, tak i rotory a vyloučení jednoho kusu naruší celý výrobní tak na lince. Výhodou je, že na pracovišti montáže pro nasouvání rotoru do statoru je možné využít zvedacího zařízení, jehož osa pohybu je shodná s osou dopravníku.

Prostor okolo montáže je větší než v předchozí variantě. Je to dáno zrušením předmontáže a jejím začleněním na montážní dopravník. Samotný dopravník bylo možné posunout cca o 1 metr vlevo. Zůstává tedy i na pravé straně dostatečný prostor pro navážení a skladování materiálu pro montáž. Není zásadní problém s křížením logistických cest.

Obě varianty mají ale několik nedostatků. Je to již zmiňovaná uzavřenost sortimentu, kdy dostat jiné produkty na montážní linku by byl logistický problém pro některé komponenty. Montážní linka a zkušebna by tak byly využity jen v dnes stanoveném dvousměnném provozu. Třetí směna by tak byla jen pro případ podstatného navýšení výroby nebo pro případ výpadku ve výrobě. Výpadek může být způsoben havárií některého z obráběcích strojů nebo i pozdním dodáním některých komponent. Další nevýhoda je v nutnosti odvážení špon, které vzniknou při obrábění. Přestože proces obrábění bude uzavřený a nedostanou se nečistoty z obráběcích strojů, tak je třeba uvažovat o způsobu odvážení špon. U výroby rotorů je přístup ze zadní strany obráběcích strojů z manipulačního prostoru, zde se dá odvoz vyřešit. Problém je s odvozem z obrábění koster. Tato technologie je uvnitř výroby a přestože se jedná o minimální množství (přídavek 1mm na opracování) odpadu, tak je nutné jej dostat pryč. Možnost je ve vybudování podzemního dopravníku, ale to je zbytečně ekonomicky náročné. Druhá možnost je ve vyvážení při přerušení výroby po skončení druhé směny. Tento koncept by byl využitelný jen po dobu dvousměnného provozu.

6.3 Montáž, varianta 3

Třetí varianta spočívá v zásadní změně. Jde o vyloučení výroby rotoru z haly U18 a přesunutí do mechanické výroby do haly U17.



Obrázek 7 Uspořádání montáže podle třetí varianty:

- 1-palety; 2-ohřev ložisek; 3-ohřev ložiskových štítů;
 4-montáž; 5-zkušebna; 6-přípravek pro vkládání rotorů;
 7-prostor pro balení a expedici

Navíjecí soubor pro výrobu navinutého statorového paketu se posunuje do druhé lodi (Příloha E). Zásobování materiálem pro navíjení bude probíhat vstupem z rampy, tak jako v předchozích variantách. Navíjecí soubor nebude přímo proti vstupu do budovy. Místo původních návrhů vznikne prostor pro zachování expedice ostatních produktů. Pouze se přesune o šest metrů vedle, mezi další podpěrné sloupky budovy. Expedice původního sortimentu by pak byla přímo proti vstupnímu otvoru do haly. Protože již dnes probíhá přes tento vstup expedice výrobků, zůstane zachovaná logistika pro expedici.

Dojde i k posunutí lisování statorového paketu do kostry a obrábění kostry. Zruší se dopravní pás pro kostry, které je teď nutné přepravit na druhou stranu haly na místo, kde je pracoviště lisování statorového paketu do kostry. Dojde tím k většímu zatížení manipulačního prostoru, který je vlevo od plánované výroby. Nicméně manipulace s jednou europaletou koster, kde je jich šest kusů, při patnáctiminutovém taktu výroby znamená zatížení této dopravní cesty průjezdem jednou za devadesát minut. To není zásadní problém, který by nějakým způsobem blokoval logistiku pro další výrobu. Proti předchozím variantám zde není zásoba koster na dopravním pásu. Řešení je pouze v zakládání do vedle stojícího regálu a tím vytvoření minimální pojistné zásoby pro výrobu.

Výrobu rotorů nahradila výroba kompletního statoru. Technologie se nemění, došlo hlavně k přemístění obráběcího stroje pro kostry k manipulačnímu prostoru. Tím se řeší problém s odvozem špon. Chlazení statorového paketu by se mohlo použít pouze k ohřevu teplé užitkové vody. Množství tepla, které je v naimpregnovaném statorovém paketu nestačí k ohřevu kostry. Tu bude potřeba předehřát například v malé peci. Mezioperační manipulace bude probíhat pomocí otočného jeřábu. Po opracování se kostra umístí na montážní paletu, která bude na montážní lince.

Výroba rotorů, která se přesune do vedlejší haly nám uvolní zároveň logistické trasy v budově U18, protože mechanická obrobna má také svoje vstupy do haly. Celá výroba rotorů včetně vyvažování proběhne tedy v hale U17.

Tato varianta je i méně náchylná při jakémkoli výpadku ve výrobě. Dojde-li k závadě nebo havárii při výrobě kompletního statoru, je možné okamžitě převést výrobu na náhradní technologii do mechanické obrobny. Stejně je možné postupovat i v případě rotoru, který je teď situován mimo montáž a navíjení. Takový přesun sice znamená vícenáklady na manipulaci, eventuálně delším čase obrábění klasickou metodou, v některých případech i nutnost výroby na dvou pracovištích. Důležité u takového řešení je, že zůstane zachovaná výroba komponent pro montáž. Tím by nenastal výpadek v dodávkách pro zákazníka.

Toto řešení zároveň umožňuje i změnu v sortimentu výrobků. Později bude možné rozšíření montáže o třetí směnu (případně nepřetržitý provoz) a montovat tak více výrobků i pro další zákazníky. Všechny ostatní díly, jako ložisková víka a štíty, je možné buď opracovávat na mechanické obrobne a navážet na montáž v požadovaném množství z meziskladu. Opracování hliníkového ložiskového víka je podstatně kratší, než počítaný takt montážní linky. Proto je možné tyto dílce umístit do meziskladu a vyrábět je ve vhodných dávkách. Případně je možné tyto dílce kupovat jako hotové a vyskladňovat na montáž z přistavených kontejnerů.

Montáž je přístupná ze dvou stran. Ze strany od navíjecího souboru, je vhodné umístit operaci napojení kabelu na vývodní vodiče z vinutí a montáž NDE strany generátoru. Rotor, který se přiveze z mechanické obrobny, se bude připravovat také na montážním páse. Využije se řešení z varianty č. 2, kde není předmontáž souběžně s montáží. Vzniklý prostor se využije pro skladování komponent, které jsou potřeba k montáži. U této manipulace a rozdělení výroby máme jistotu, že všechny dílce včetně rotorů je možné navážet přesně dle potřeby. Jediný problém může nastat u kompletního statoru. Dojde-li ke zdržení na poslední operaci při obrábění statoru, způsobí to prostoj na montáži. Řešením takové situace, je vytvořit na začátku montážního pásu jednu pozici pro odkládání hotových opracovaných statorů.

6.4 Technologické časy

V současné době probíhá výroba ověřovací série generátorů. Na těchto generátorech se ověřují různé varianty montáží. Průběh napojení vývodního kabelu na vývodní vodiče lze optimalizovat pouze v přípravě kabelu (odizolování), izolačních a lisovacích trubiček. Je tedy potřeba koupit hotovou kabelovou konfekci, připravenou tak, že už budou konce vodičů připravené na spojení lisovací trubicí. Tento spoj se potom zaizoluje izolační trubicí, naformuje k čelu vinutí a upevní na čela vinutí.

Pro mechanickou montáž jsou vyzkoušené dva způsoby montáže. Jedna možnost spočívá ve vertikální montáži rotoru do statoru. Nejdříve se na kostru připevní štít NDE a pak se musí otočit kostra o 90° nahoru stranou DE. Rotor se nachystá v horizontální poloze, nasadí se vnitřní víka, obě ložiska, štít DE a vnější víko strany DE. Rotor se otočí tak, aby strana DE byla nahoru. Pomocí závěsného oka, které se našroubuje do středícího závitu hřídele, se jeřábem spustí do kostry. Přišroubuje se štít DE a pak je možné otočit kostru i s rotorem zpět na patky motoru. Tato montáž má výhodu v kontrole při spouštění rotoru do kostry, když pomocí naváděcího krytu je možné přesné nasměrování rotoru. Tím jsou chráněna čela vinutí před případným poškozením při montáži. Nevýhoda je v nutné manipulaci s rotorem do vertikální polohy a také dvojité manipulace s kompletním statorem nejdříve do vertikální polohy a pak zpět i s rotorem do horizontální polohy. Při této manipulaci je velké nebezpečí poškození vývodního kabelu, který vede z kostry přes kabelovou vývodku. Na montážní lince by takový způsob znamenal složitou montážní paletu, která by umožnila překlopení kostry. Otočení rotoru také vyžaduje přípravek, ve kterém by se otočil do vertikální polohy před montáží do kostry. Časová náročnost pro manipulaci, nutnou aretaci kostry na paletě, masivní řešení montážní palety, manipulace s prázdnou a těžkou paletou zpět na začátek montáže, to je výčet několika dalších nevýhod tohoto řešení montáže.

Druhá možnost montáže generátoru je jen v horizontální poloze. Odpadne zbytečné otáčení komponent a tím se zjednoduší montáž. Po nachystání ložisek na rotor, se pak manipuluje s rotorem pomocí jednoduchého háku, který se nasouvá na volný konec hřídele. Na kostru je opět nutné umístit před zasunutím rotoru do kostry naváděcí a zároveň i ochranný kryt čel vinutí. Výhodou této montáže je, že není nebezpečí v poškození vývodního kabelu, nemusí se manipulovat s kostrou do vertikální polohy, jednoduchá montážní paleta. Nevýhodou tohoto řešení je, že i při použití naváděcího krytu čel vinutí na rotor, může při neodborné manipulaci dojít k poškození vinutí.

Při montáži ověřovací série se otestovaly oba dva způsoby montáže a jako výhodnější se zvolila varianta pouze horizontální polohy. Jednotlivé montážní úkony se změřily a provedlo se jejich předběžné rozdělení jednotlivým pracovníkům. Měření bylo provedené tak, že začátek měření byl vždy po skončení předchozí operace. Protože i náběh sériové výroby bude postupný a než bude dosažen cílový výrobní takt linky 15 minut, je možné provádět optimalizaci a úpravu montážních časů. Při náběhu sériové výroby se předpokládá s časem kolem 25 minut na jeden stroj.

V tabulce č. 1 jsou všechny naměřené časy jednotlivých operací, které je nutné provést na montáži. Přiřazení jednotlivým pracovníkům bude rozděleno podle způsobu montáže.

OPERACE	[min]
Montáž zem.šroubu	1:30
Kabelové vývodky, M32+M16	1:15
Hlavní kabel, protažení, utažení vývodky	2:30
Pomocný kabel, protažení, utažení vývodky	2:00
Připojení zem.vodiče	1:30
Svorkování výv.vodiče s čelem vinutí, formování	4:00
Svorkování pom.vodiče, formování	2:30
Zajištění na čele	3:45
Víko ložiskové vnitřní NDE, nasazení	0:20
Ložisko NDE (6313), vybalení, indukční ohřev	0:30
Ložisko NDE (6313), montáž	0:15
Víko ložiskové vnitřní DE, nasazení	0:20
Ložisko DE (6314), vybalení, indukční ohřev	0:30
Ložisko DE (6314), montáž	0:15
Pojistný kroužek	0:15
Štít DE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00
Štít DE, nasazení na ložisko	1:00
Přišroubování vnitřního víka DE, 4xM8	1:00
Vnější víko DE, nasazení	0:20
Přišroubování vnějšího víka DE, 4xM8	1:30
Štít NDE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00
Vnější víko NDE, 10 pružin	1:00
Podložky na ložisko NDE, vložení do štítu	0:30
Šroub stavěcí do štítu NDE, 2xM12	0:30
Zátka Pg do štítu NDE	0:15
Krytka mazací hlavice, 2ks	0:15
Zasunutí rotoru do kostry pomocí přípravku	2:00
Přišroubování štítu DE ke kostře, 8xM8	3:00
Štít NDE, nasazení na ložisko a kostru	1:00
Přišroubování vnitřního víka NDE, 4xM8	1:00
Přišroubování štítu NDE ke kostře, 4xM8	1:30
Přišroubování vnějšího víka NDE, 6xM8	2:00

Tabulka 1 Naměřené operační časy

Podle prvního návrhu výroby (Příloha C) jsou operace rozdělené následovně mezi tři pracovníky. Pracovník č. 1 má za úkol provést svorkování. Celkový čas, potřebný na kompletní provedení připojení vodičů, je 19 minut. Za tuto dobu to může stihnout jen při náběhu výroby, proto se zvolila možnost rozdělit svorkování mezi více montérů. Montáž kabelových vývodků a zemního šroubu provede tedy pracovník č. 2, který má zároveň za úkol předmontáž rotoru a montáž strany DE. Ten má sice největší prostor, kde se musí pohybovat, jednak kolem předmontáže rotoru a na dvou místech montáže. Poprvé je to při montáži kabelových vývodků a zemního šroubu, podruhé při zasouvání rotoru do kostry. Tím jsme se dostali na časy, které se blíží cílovým 15 minutám. Pracovník č. 1 má celkový čas 16:15 minut, pracovník č. 2 má celkový čas 15:00 minut a pracovník č. 3 potřebuje celkem 9:00 minut. Přřazení pracovníku k operacím v tabulce č. 2.

OPERACE	[min]	pracovník
Montáž zem.šroubu	1:30	2
Kabelové vývodky, M32+M16	1:15	2
Hlavní kabel, protažení, utažení vývodky	2:30	1
Pomocný kabel, protažení, utažení vývodky	2:00	1
Připojení zem.vodiče	1:30	1
Svorkování výv.vodiče s čelem vinutí, formování	4:00	1
Svorkování pom.vodiče, formování	2:30	1
Zajištění na čele	3:45	1
Víko ložiskové vnitřní NDE, nasazení	0:20	2
Ložisko NDE (6313), vybalení, indukční ohřev	0:30	2
Ložisko NDE (6313), montáž	0:15	2
Víko ložiskové vnitřní DE, nasazení	0:20	2
Ložisko DE (6314), vybalení, indukční ohřev	0:30	2
Ložisko DE (6314), montáž	0:15	2
Pojistný kroužek	0:15	2
Štít DE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00	2
Štít DE, nasazení na ložisko	1:00	2
Přišroubování vnitřního víka DE, 4xM8	1:00	2
Vnější víko DE, nasazení	0:20	2
Přišroubování vnějšího víka DE, 4xM8	1:30	2
Štít NDE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00	3
Vnější víko NDE, 10 pružin	1:00	3
Podložky na ložisko NDE, vložení do štítu	0:30	3
Šroub stavěcí do štítu NDE, 2xM12	0:30	3
Zátka Pg do štítu NDE	0:15	3
Krytka mazací hlavice, 2ks	0:15	3
Zasunutí rotoru do kostry pomocí přípravku	2:00	2
Přišroubování štítu DE ke kostře, 8xM8	3:00	2
Štít NDE, nasazení na ložisko a kostru	1:00	3
Přišroubování vnitřního víka NDE, 4xM8	1:00	3
Přišroubování štítu NDE ke kostře, 4xM8	1:30	3
Přišroubování vnějšího víka NDE, 6xM8	2:00	3

Tabulka 2 Rozdělení operací pro návrh č. 1

Ve druhém návrhu (Příloha D) už není možné pro jednoho pracovníka se pohybovat z obou stran montážní linky. Došlo tedy k přesunu některých operací mezi pracovníky. Především montáž kabelových vývodků a zemnicího šroubu provede pracovník č. 1 a přenechá zajištění kabelů na čele pracovníkovi č. 3. Tím se přiblížíme k cílovým časům u prvního pracovníka na 15:15 minut, u druhého 11:10 minut a u třetího na 13:50 minut. Rozdělení operací v tabulce č. 3.

OPERACE	[min]	pracovník
Montáž zem.šroubu	1:30	1
Kabelové vývodky, M32+M16	1:15	1
Hlavní kabel, protažení, utažení vývodky	2:30	1
Pomocný kabel, protažení, utažení vývodky	2:00	1
Připojení zem.vodiče	1:30	1
Svorkování výv.vodiče s čelem vinutí, formování	4:00	1
Svorkování pom.vodiče, formování	2:30	1
Zajištění na čele	3:45	3
Víko ložiskové vnitřní NDE, nasazení	0:20	3
Ložisko NDE (6313), vybalení, indukční ohřev	0:30	3
Ložisko NDE (6313), montáž	0:15	3
Víko ložiskové vnitřní DE, nasazení	0:20	2
Ložisko DE (6314), vybalení, indukční ohřev	0:30	2
Ložisko DE (6314), montáž	0:15	2
Pojistný kroužek	0:15	2
Štít DE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00	2
Štít DE, nasazení na ložisko	1:00	2
Přišroubování vnitřního víka DE, 4xM8	1:00	2
Vnější víko DE, nasazení	0:20	2
Přišroubování vnějšího víka DE, 4xM8	1:30	2
Štít NDE, mazivo, mazací hlavice, ohřev	1:00	3
Vnější víko NDE, 10 pružin	1:00	3
Podložky na ložisko NDE, vložení do štítu	0:30	3
Šroub stavěcí do štítu NDE, 2xM12	0:30	3
Zátka Pg do štítu NDE	0:15	3
Krytka mazací hlavice, 2ks	0:15	3
Zasunutí rotoru do kostry pomocí přípravku	2:00	2
Přišroubování štítu DE ke kostře, 8xM8	3:00	2
Štít NDE, nasazení na ložisko a kostru	1:00	3
Přišroubování vnitřního víka NDE, 4xM8	1:00	3
Přišroubování štítu NDE ke kostře, 4xM8	1:30	3
Přišroubování vnějšího víka NDE, 6xM8	2:00	3

Tabulka 3 Rozdělení operací pro návrh č. 2 a 3

Rozdělení operací na montáži ve třetí variantě je stejné, jako u druhé varianty. V obou případech je možné provést montáž zemnicího šroubu, případně kabelových vývodek pracovníkem z pracoviště obrábění koster. Ten má v průběhu strojního času při obrábění prostor udělat tyto operace. Provede kontrolu po opracování pomocí měřidel nebo kalibru a našroubuje zemnicí šroub do kostry. Teprve po tom přemístí kompletní stator na montážní linku. Další redukce času může být ještě při náběhu sériové výroby a případném doplnění pracovišť o nové přípravky nebo po vylepšení stávajících přípravků, které umožní zkrácení montážních časů.

7 Zkoušení elektromotorů a generátorů

Zákazník požaduje kontrolu hlučnosti asynchronního generátoru. Hluk nám vzniká z vibrujících částí stroje. Tyto vibrace musí být vybuzeny otáčením rotačních částí. Z mechanického hlediska jsou největším zdrojem hlučnosti ložiska. Jak se tedy vypořádat s tímto problémem? Pracovník zkušebny může při kusové zkoušce určit poslechem, který z generátorů je hlučný. K takovému posouzení je ale nutné zajistit odhlučněnou místnost, kde by neovlivňoval posouzení hluk z okolní výroby. V ní může pracovník posoudit při běhu na prázdko hlučnost ložisek. Nicméně takový způsob je pro výrobce nedostatečný, záleží jen na pocitu zaměstnance, jak který stroj vyhodnotí. Také při případné reklamaci není k dispozici žádný protokol s naměřenou hodnotou hluku. Tímto způsobem by nutně vznikly nároky na stavební úpravy, které by zajistily odhlučnění. Plocha, která by se musela rezervovat pro takto vytvořenou zkušebnu by neúměrně zabírala místo v hale. Další možností je v převážení hotových výrobků do již existující zkušebny. Nicméně manipulace s tímto řešením by byla jen o více nákladech a o rozbití plánované logistické a stavební návaznosti zkušebny na montáž a samozřejmě i návaznost expedice na zkušebnu.

Jako nejvhodnější se naskýtá provádět měření hluku nebo vibrací při kusové zkoušce. Je tedy nutné provést několik testovacích měření na vybraném vzorku generátorů. K měření je potřeba mít jak vyhovující tak nevyhovující výrobky. Podle analýzy z těchto měřících testů následně rozhodnout, jakou zvolit formu měření pro určení dobrých výrobků. Měření musí být rychlé, průkazné a musí být zajištěná opakovatelnost v reálných podmínkách zkušebny, která bude navazovat na montáž.

Protože se jedná o asynchronní generátor, tak při zkoušení se připojí na zdroj elektrického proudu a bude se provozovat jako elektromotor. Tak se proměří i elektrické vlastnosti stroje.

7.1 Test měření hluku

Měření hluku se provádí v bezdozvukové komoře (obrázek č. 8). Tato komora je na stěnách opatřena klíny, na kterých dochází k pohlcování zvukových vln. Samotné měření hluku se snímá pomocí mikrofonu. Takové jsou tedy laboratorní podmínky, které aplikovat do praxe není jednoduché, ve většině případů prakticky nemožné. Budovat bezdozvukovou komoru pro měření každého kusu generátoru by bylo neefektivní. Byl by problém s manipulací uvnitř komory a stavebními rozměry komory, tím by nešlo dodržet potřebný takt montážní linky. Zákazník sám nestanovil maximální hodnotu hluku, pouze určil, který stroj nevyhovuje pro jeho aplikaci. Není tedy nutné provádět měření v akreditované zkušebně. Zvolili jsme tedy orientační měření na nepoužívané zkušebně elektrických motorů, kde není žádný hluk z okolí. Při testovacím měření jsme umístili mikrofon do vzdálenosti 0,5m od měřeného generátoru. Pro měření se většinou používá kondenzátorový mikrofon s polarizačním napětím.



Obrázek 8 Bezdozvuková komora s mikrofonem

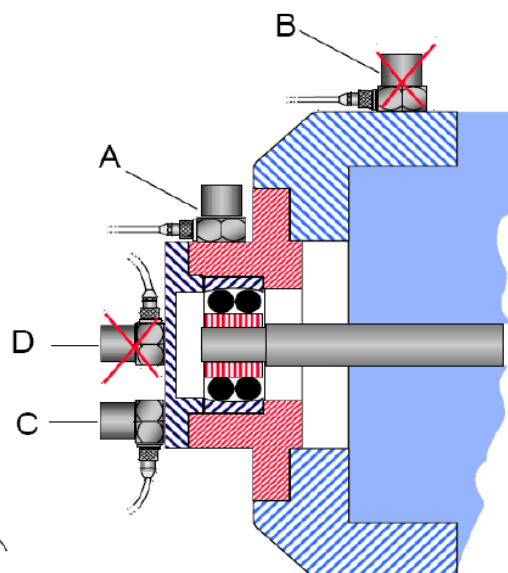
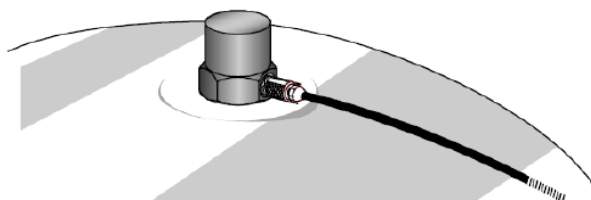
7.2 Test měření vibrací

Zdrojem vibrací jsou v případě točivých elektrických strojů především ložiska. Dále se nám zcela jistě ve vyhodnocení projeví i nevyváženost rotoru. Měření je možné provést buď kontaktním nebo bezkontaktním způsobem. Bezkontaktní způsob se v tomto případě hodí opět na laboratorní podmínky a je při investici výrazně dražší než kontaktní snímání. Měření se tedy provede akcelerometry, jejichž umístění musí být na vhodném místě. Dle obrázku se musíme vyhnout místům, kde může vznikat rezonance. Došlo by ke snímání dalších parazitních frekvencí, které by zhoršovaly vyhodnocení naměřených hodnot. Nejlepší umístění akcelerometru je do polohy A nebo C, nevhodné je B a D (obrázek č. 9)

Vyhýbáme se místům, kde vzniká rezonance!

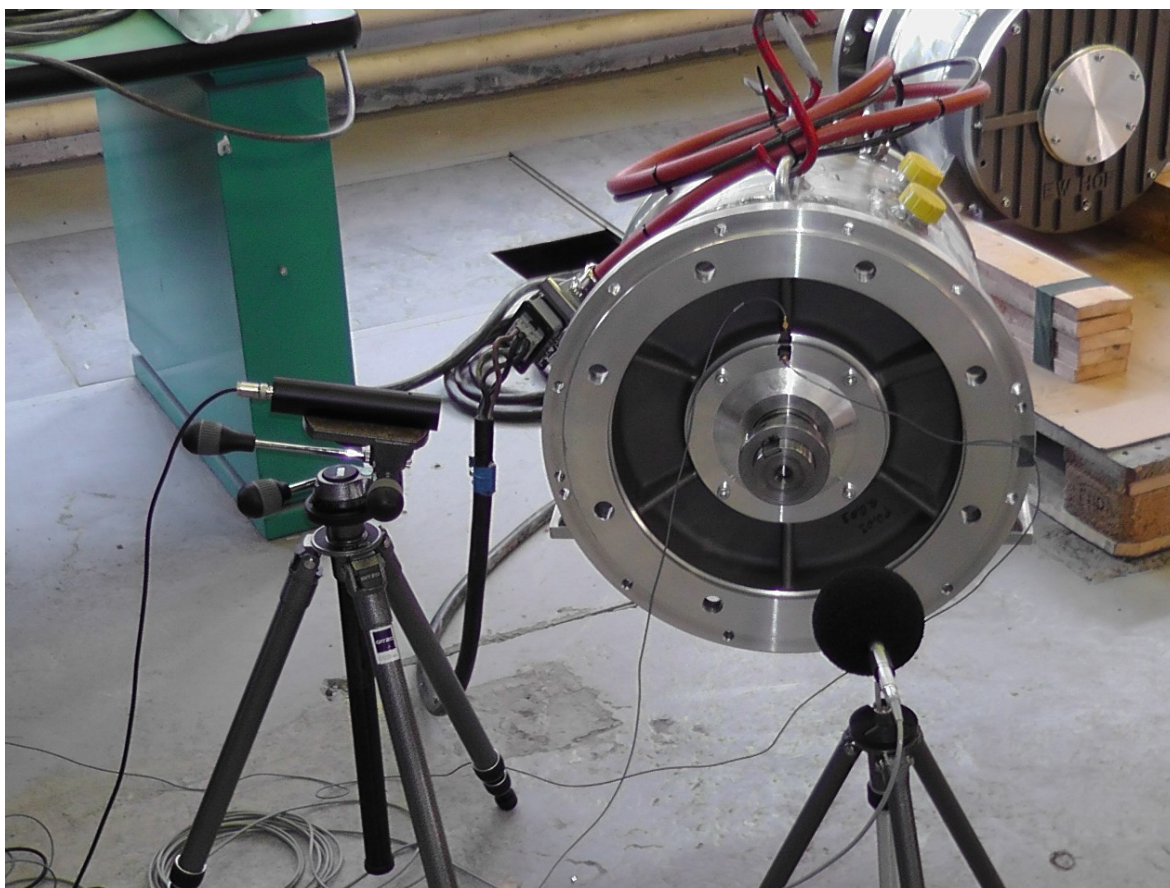


Např. uprostřed krytu a pod.



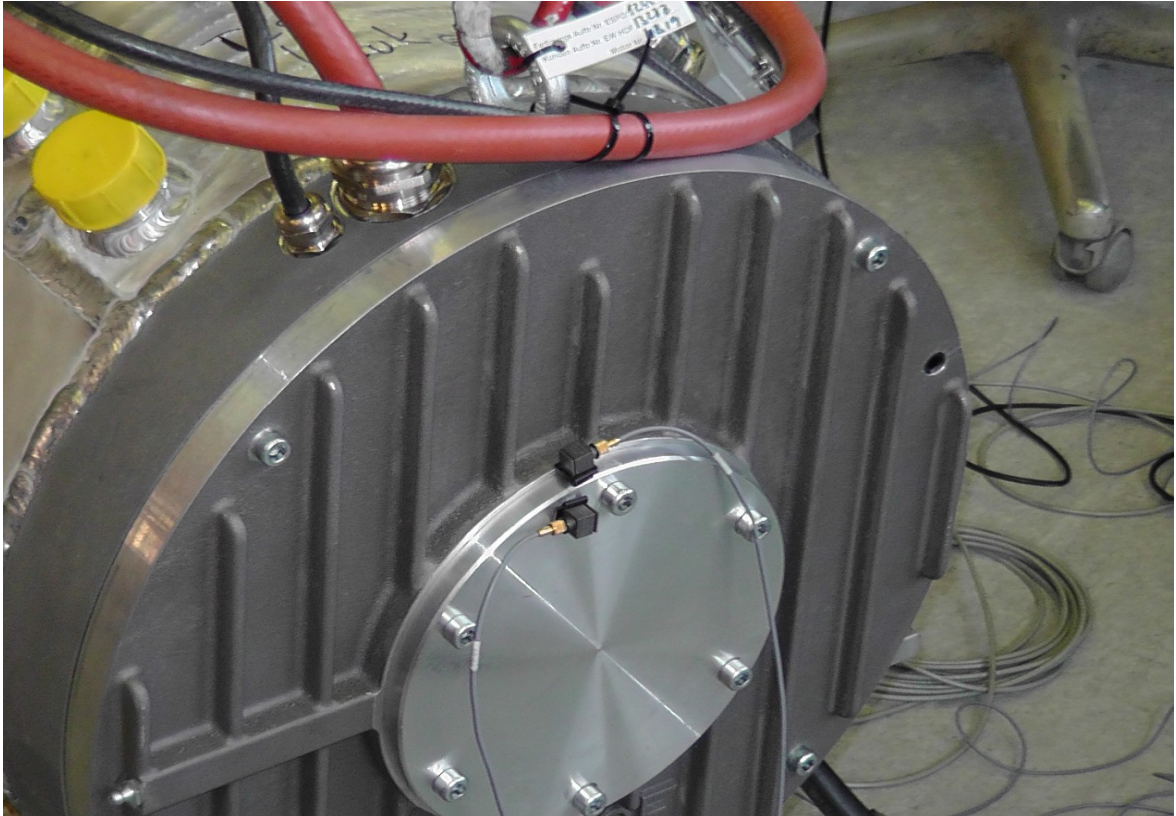
Obrázek 9 Způsob umístění akcelerometrů

Při prvním testu se provedlo připevnění akcelorometrů pomocí vteřinového lepidla. Jednalo se o jednoosé akcelerometry, jeden snímal zrychlení v axiálním směru a druhý v radiálním směru. Z každé strany měřeného generátoru byla umístěná jedna dvojice snímačů, celkem se tedy použily čtyři akcelerometry. Protože norma pro měření vibrací točivých elektrických strojů požaduje měření buď na pevném základě nebo zavěšení na pružném závěsu, tak se zvolil způsob zavěšení na závěsu. Připevnění na pevný základ by v sériové výrobě znamenalo jen zbytečnou manipulaci, utahování upevňovacích šroubů a ze stavebního hlediska vybudování dostatečně velkého a hmotného základu, který by byl od okolí pružně oddělen. Zavěšení na pružném závěsu vyžaduje hlavně mít k dispozici vhodné zvedací zařízení. Měření bylo tedy prováděné na závěsu (obrázek č. 10) a jako alternativa se zároveň vyzkoušela i možnost umístění na transportní podložce, která je z tvrzeného polystyrenu. Jednalo se o vyzkoušení, jak se změní hodnoty mezi zavěšením a uložením na podložce. Uvažovalo se pouze o možnosti volby náhradního řešení pro uložení při běžné zkoušce.



Obrázek 10 Měření na závěsu

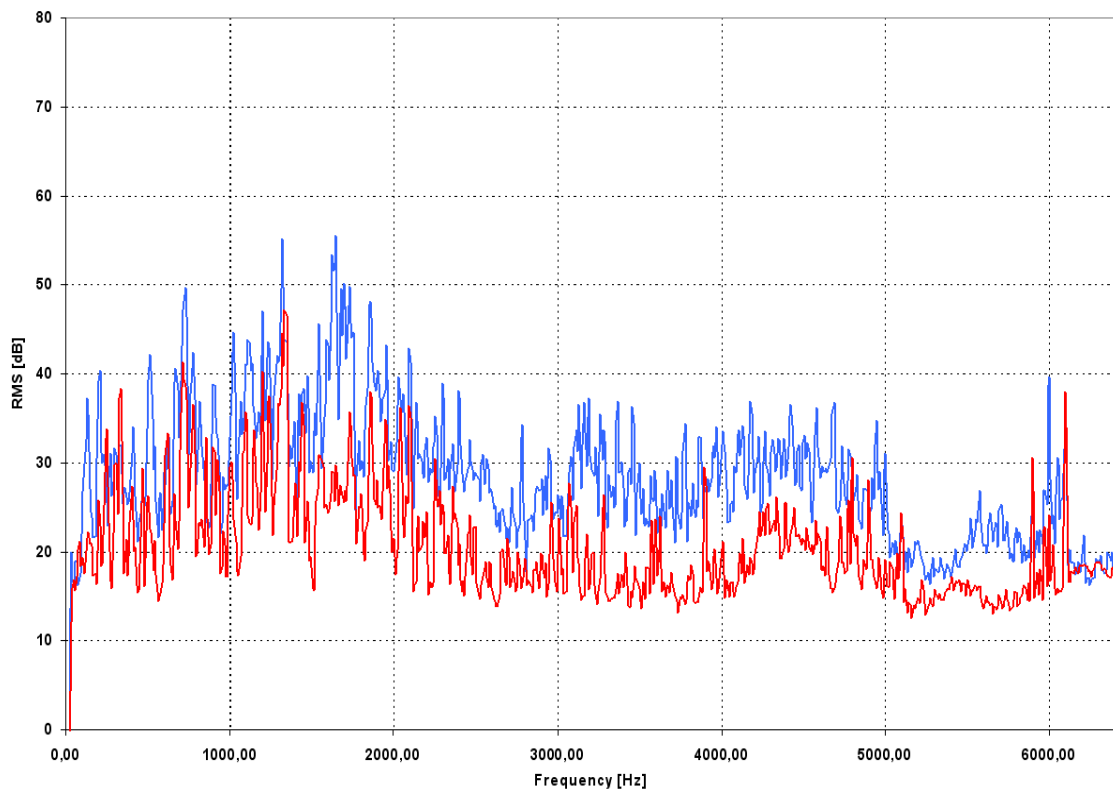
Upevnění akcelerometrů pomocí vteřinového lepidla bylo také jen u prvních testů. Pro měření v sériové výrobě je nutné mít akcelerometry s dostatečně silným permanentním magnetem. Tyto akcelerometry by byly trojosé, umístěné na šrouby, které připevňují vnější ložisková víka k ložiskovým štítům. Pro porovnání je samozřejmě nutné provést měření společně s variantou připevnění magnetem a lepidlem a posoudit případný vliv upevnění na naměřené hodnoty. Upevnění akcelerometrů při testovacím měření ze strany NDE je vidět na obrázku č. 11.



Obrázek 11 Upevnění akcelerometrů na straně NDE

7.3 Výsledky měření

Délka záznamu při měření byla 10 s, měřilo se společně zrychlení a hluk. Na každém generátoru se provedl každý náměr celkem třikrát, pro eliminaci případné chyby při měření. Zároveň se provedl test pro zjištění vlastní frekvence celého generátoru. Hluk byl u nevyhovujícího stroje naměřen na maximální hodnotě 56 dB (modrá barva). Tato hodnota byla proti 47 dB (červená barva) u vyhovujícího generátoru o 9 dB vyšší. Jednalo se o nízkofrekvenční hluk v kmitočtu do 3 kHz. Protože lidské ucho je necitlivější v pásmu od 1 kHz do 4 kHz, tak je i na obrázku č. 12 vidět, že nejvyšší naměřené hodnoty jsou v rozmezí od 1 kHz do 2 kHz. Hladina hluku do 50 dB se bere jako normální nehlásitý hovor, tato hodnota je také maximální pro duševní práci. Z tohoto měření je tedy zřejmé, že hladina hluku ve výrobě bude vyšší, než je hluchnost měřených generátorů.

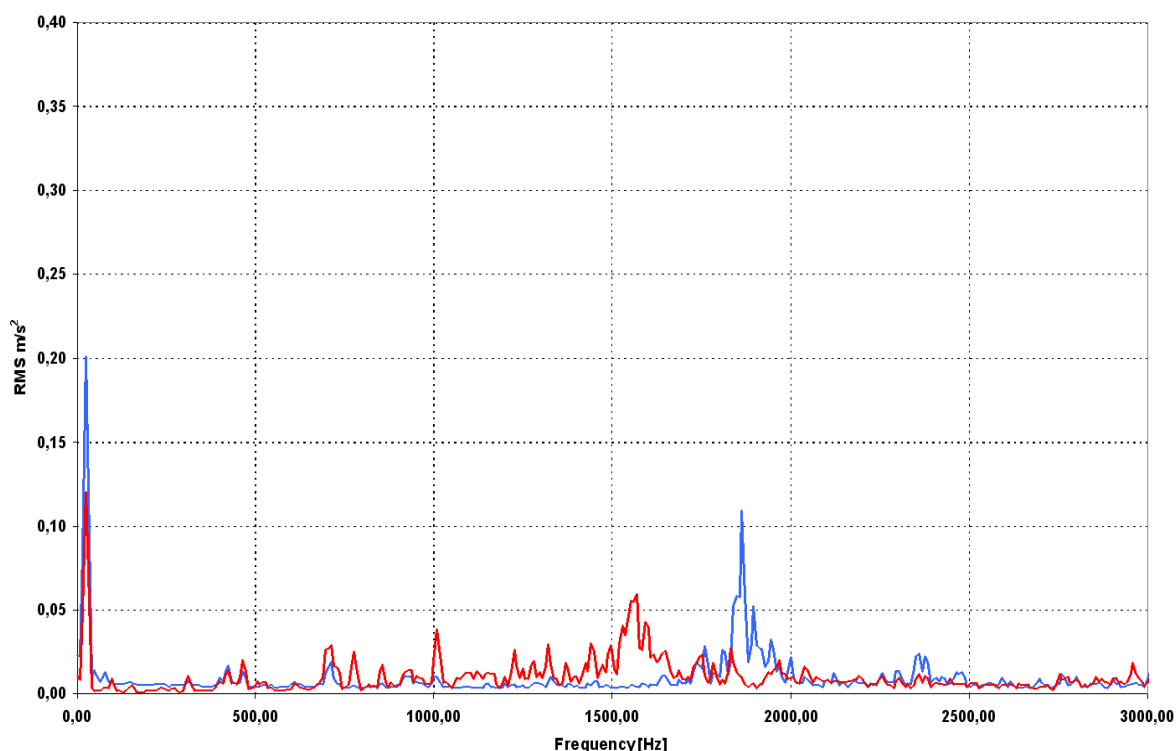


Obrázek 12 Hluk asynchronních generátorů

Vyhodnotíme měření vibrací asynchronního generátoru, který měl maximální hodnotu hluku 47dB a byl vyhodnocen poslechem bez závad. Nejdříve se podíváme na radiální směr (obrázek č. 13), modrá barva je snímač na straně DE, červená je snímač na straně NDE. Na začátku jsou vidět hned dvě špičky, jedna $0,2 \text{ m.s}^{-2}$ a druhá $0,12 \text{ m.s}^{-2}$. Jedná se o nevyváženost stroje, která se projevuje na první otáčkové frekvenci. Je dominantní v radiálním směru a její hodnota roste s kvadrátem frekvence otáček. Spočítáme ji podle vzorce níže uvedeného vzorce (1), kde otáčky za minutu podělíme 60.

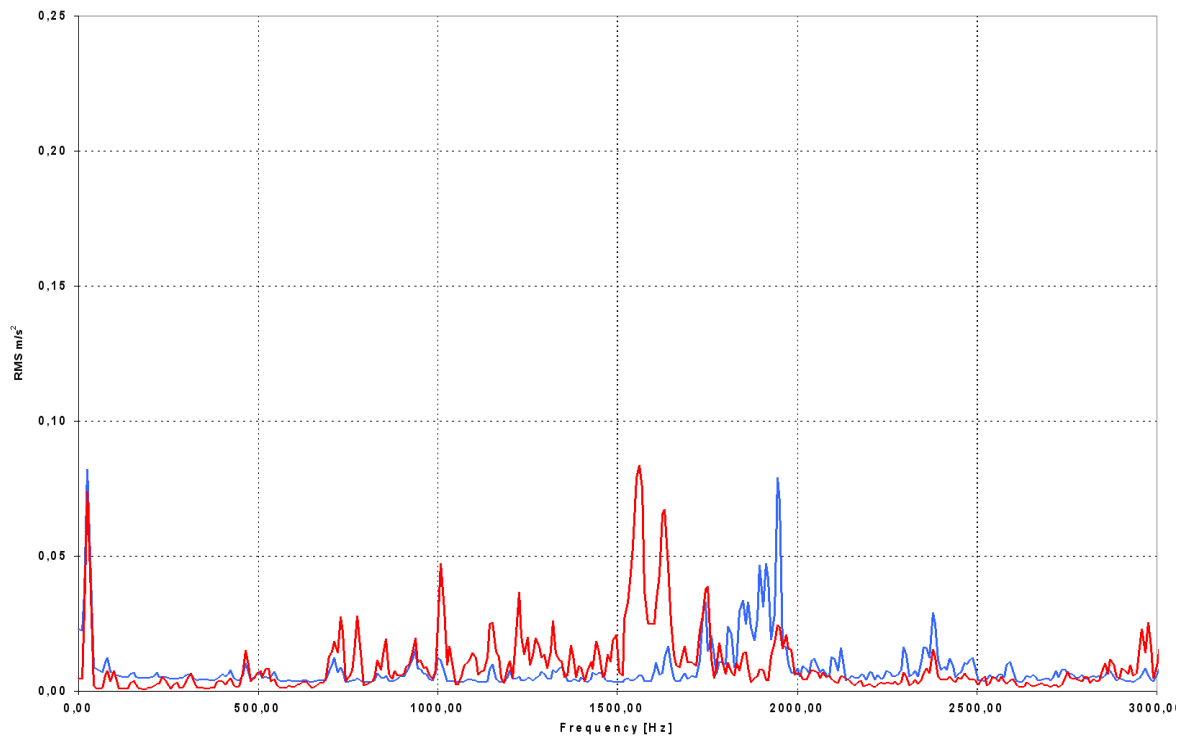
$$f = \frac{n}{60} = \frac{1500}{60} = 25\text{Hz} \quad (1)$$

Další hodnoty, které jsou na grafu vidět mají zanedbatelné hodnoty, jediná výraznější je rezonanční frekvence v oblasti 1800Hz. Ale její hodnota je $0,12 \text{ m.s}^{-2}$ a nezpůsobuje nám nežádoucí rozkmitání stroje.



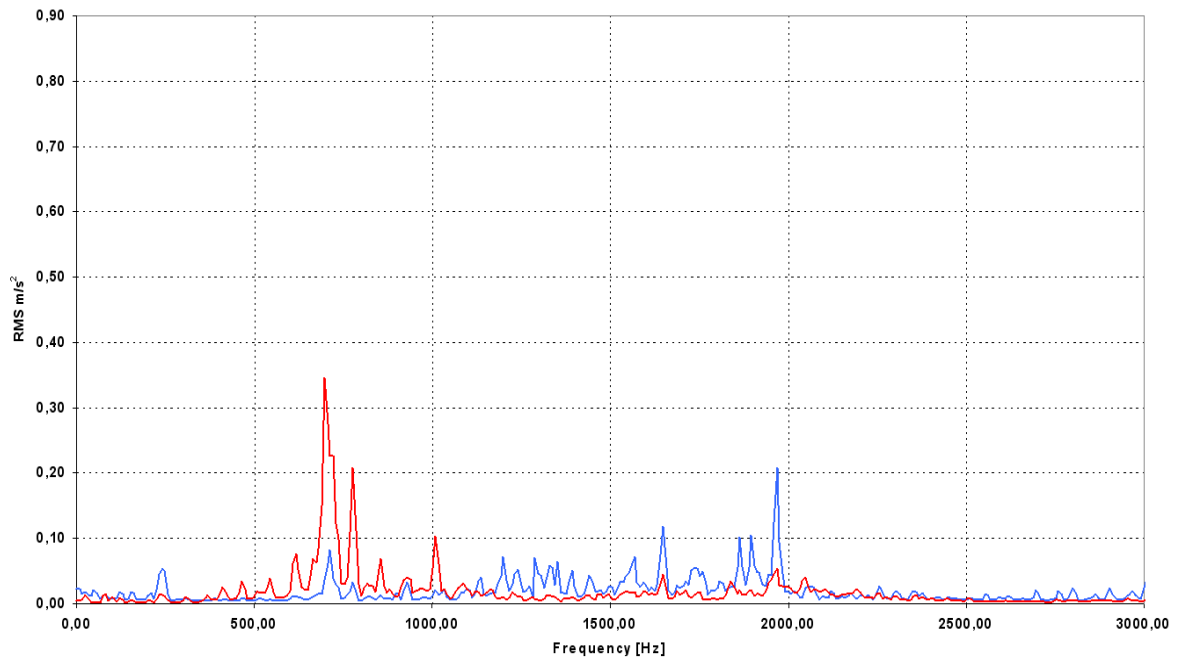
Obrázek 13 Autospektrum vibrací vyhovujícího stroje v radiálním směru na závěsu

Následující obrázek č. 14 zobrazuje stejný stroj, ale měřený na transportní podložce. Akcelerometr ze strany DE je znázorněn modrou barvou, na straně NDE má barvu červenou. Průběh vibrací se nám shoduje, v tomto případě se snížila nevyváženost rotoru na první otáčkové frekvenci pod $0,1 \text{ m.s}^{-2}$. Ostatní vibrace nijak nevybočují z předchozího měření, které bylo provedené na závěsu. V celém spektru měření jsou všechny hodnoty spektra menší než $0,1 \text{ m.s}^{-2}$.



Obrázek 14 Autospektrum vibrací vyhovujícího stroje v radiálním směru na podložce

Na dalším obrázku č. 15 máme stejný stroj, ale s axiální složkou zrychlení, měření provedené na závěsu. Modrá barva je snímač na straně DE, červená na straně NDE. Zde není vidět nevyváženost rotoru na první otáčkové frekvenci. Projevuje se nám tady frekvence vnějších ložiskových kroužků. Větší výchylka je na straně NDE, jedná se o axiálně volné ložisko, které je v axiálním směru předepnuté pružinami. Strana DE má ložisko axiálně pevné a vliv tlačných pružin na vnějším kroužku je podstatně menší. Maximální naměřené vibrace mají hodnotu $0,35 \text{ m.s}^{-2}$. I v oblasti rezonanční frekvence je průběh klidný a měřený stroj není hlučný.



Obrázek 15 Autospektrum vibrací vyhovujícího stroje v axiálním směru na závěsu

Chybová frekvence vnějšího ložiskového kroužku kuličkového ložiska se spočítá následovně:

$$f_{BPFO} = \frac{N}{2} * (f_i - f_o) * (1 - x) = \frac{8}{2} * (25 - 0) * (1 - 0,2) = 80 \text{ Hz} \quad (2)$$

N – počet valivých členů (kuliček)

f_i – frekvence otáčení vnitřního kroužku

f_o – frekvence otáčení vnějšího kroužku

x – pro kuličková ložiska je hodnota 0,2

Protože při výrobě ložisek dochází vlivem upnutí k deformaci vnějších i vnitřních kroužků, počítáme také s násobky ložiskových frekvencí. Počítáme tedy i s trojnásobkem, šestinásobkem a devítinásobkem spočítané základní frekvence. Takže násobky frekvence vnějšího ložiskového kroužku budou 240, 480 a 720 Hz. Maximální hodnota zrychlení, které bylo změřené je $0,35 \text{ m.s}^{-2}$ na 720 Hz.

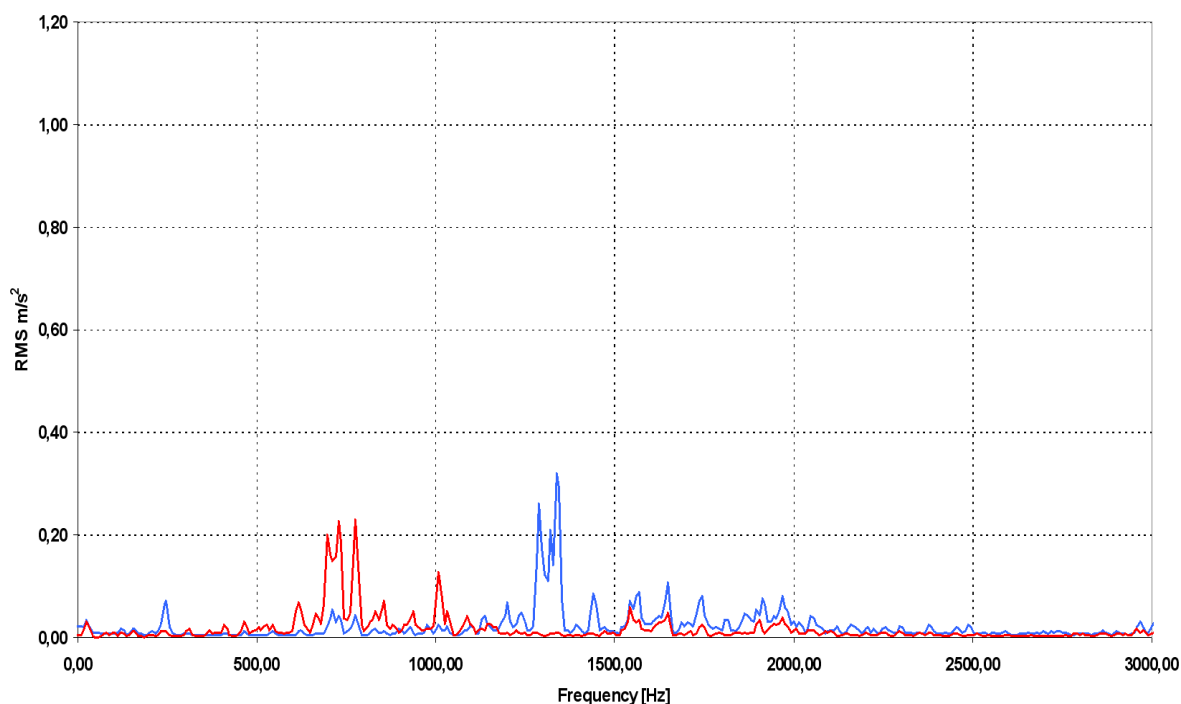
Chybová frekvence vnitřního kroužku se počítá obdobně:

$$f_{BPFI} = \frac{N}{2} * (f_i - f_o) * (1 + x) = \frac{8}{2} * (25 - 0) * (1 + 0,2) = 120 \text{ Hz} \quad (3)$$

Stejným způsobem musíme brát v úvahu i násobky základní frekvence. Odtud budou chybové frekvence vnitřního kroužku kuličkového ložiska 360, 720 a 1080 Hz.

Spočítané hodnoty frekvencí se mohou mírně lišit od skutečnosti, protože hodnota, která se dosazuje za x , je přibližně 0,2. Nahrazujeme tím stykový úhel u kuličkových ložisek, který je dán poměrem axiální a radiální síly působící na ložisko. Přestože známe charakteristiku pružin, které nám vytváří axiální sílu, tak vlivem tolerancí a odchylek ve výrobě se tato síla může měnit. Se změnou axiální síly se mění i stykový úhel, změní se nám tedy i poměr mezi axiální a radiální silou.

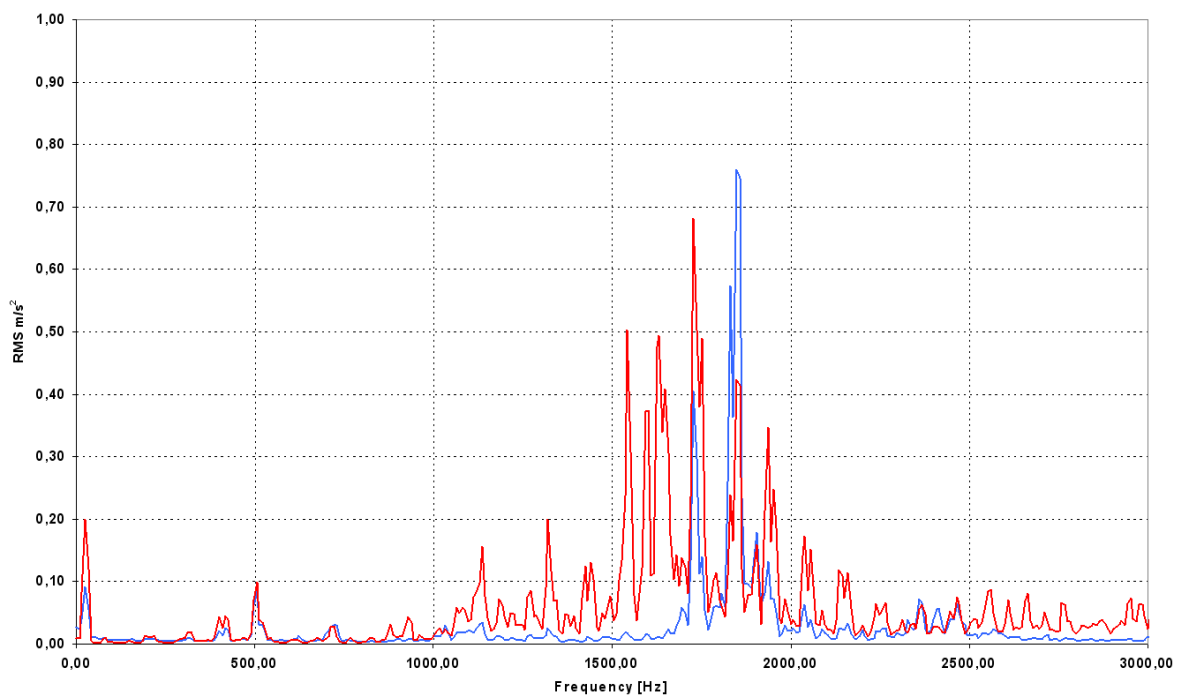
Axiální složky vyhovujícího asynchronního generátoru při měření na podložce jsou na obrázku č. 16. Stejně jako u radiálních složek byla shoda průběhu při měření na závěsu a na podložce, tak i průběh axiálních složek je podobný v obou měřeních. Maximální hodnota zrychlení byla v tomto případě $0,3 \text{ m.s}^{-2}$.



Obrázek 16 Autospektrum vibrací vyhovujícího stroje v axiálním směru na podložce

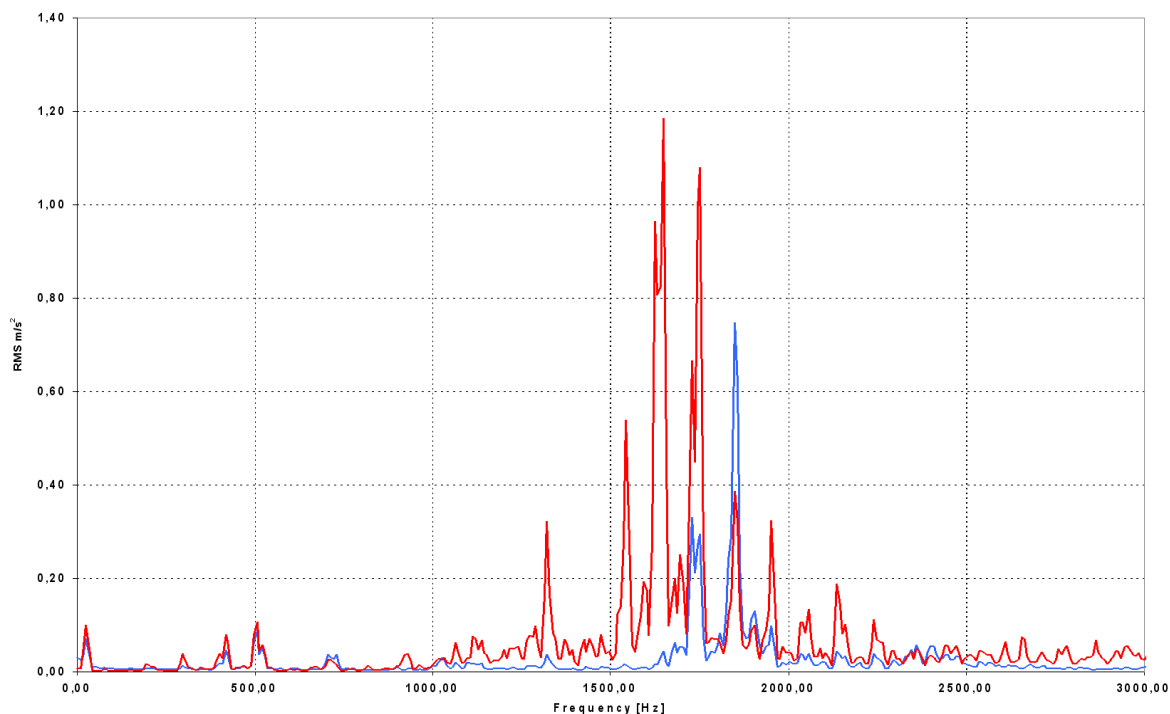
U tohoto generátoru nepřekročilo žádné z měření hodnotu zrychlení $0,35 \text{ m.s}^{-2}$. Projevy spektra vibrací jsou klidné jak v radiálním tak axiálním směru. V radiálním směru je dominantní nevyváženost rotoru. V axiálním směru jsou patrné frekvence ložisek včetně jejich násobků. Především se jedná o ložisko ze strany NDE, které je axiálně volné a předepnuté v axiálním směru pružinami. Po skončení a vyhodnocení všech měření vyhovujícího asynchronního generátoru se dá předběžně uvažovat i o maximální hodnotě, která by byla limitní pro stanovení velikosti vibrací pro vyhovující výrobky. Tato hodnota by se měla předběžně pohybovat pod $0,4 \text{ m.s}^{-2}$ v měřeném rozsahu do 3kHz. U nevyváženosti rotoru by tato hodnota měla být ještě nižší. K přesnějšímu určení bude nutné provést ještě několik dalších měření na více generátorech.

Autospektrum vibrací hlučného asynchronního generátoru v radiálním směru, měření provedené na závěsu, je na následujícím obrázku č. 17. Modrá barva je přiřazená akcelerometru na straně DE, červená patří akcelerometru na straně NDE. Tak jako u prvního, méně hlučného stroje, je na první otáčkové frekvenci 25 Hz vidět nevyváženost rotoru. Naměřené hodnoty jsou stejné, z čehož se dá vyvodit, že nevyváženost rotoru se dá určit a dobře identifikovat, ale nebude za vznikem vibrací. Ložiska v radiálním směru nevykazují žádné vady, které by způsobily rozkmitání asynchronního generátoru. Z naměřených složek radiálního směru tedy nemůžeme určit původ rozkmitání, ale dá se již tento stroj vyhodnotit jako vadný. U vyhovujícího asynchronního generátoru, mimo nevyváženost rotoru, není měřením zaznamenána hodnota vibrací v radiálním směru větší než $0,15 \text{ m.s}^{-2}$, zatímco u nevyhovujícího máme naměřené hodnoty pětikrát větší. Přesto je v intervalu od 1500 Hz do 2000 Hz jasně vidět spektrum vibrací s hodnotou nad $0,5 \text{ m.s}^{-2}$. Největší špička je naměřená v oblasti rezonanční frekvence 1800 Hz a velikost zrychlení je $0,75 \text{ m.s}^{-2}$.



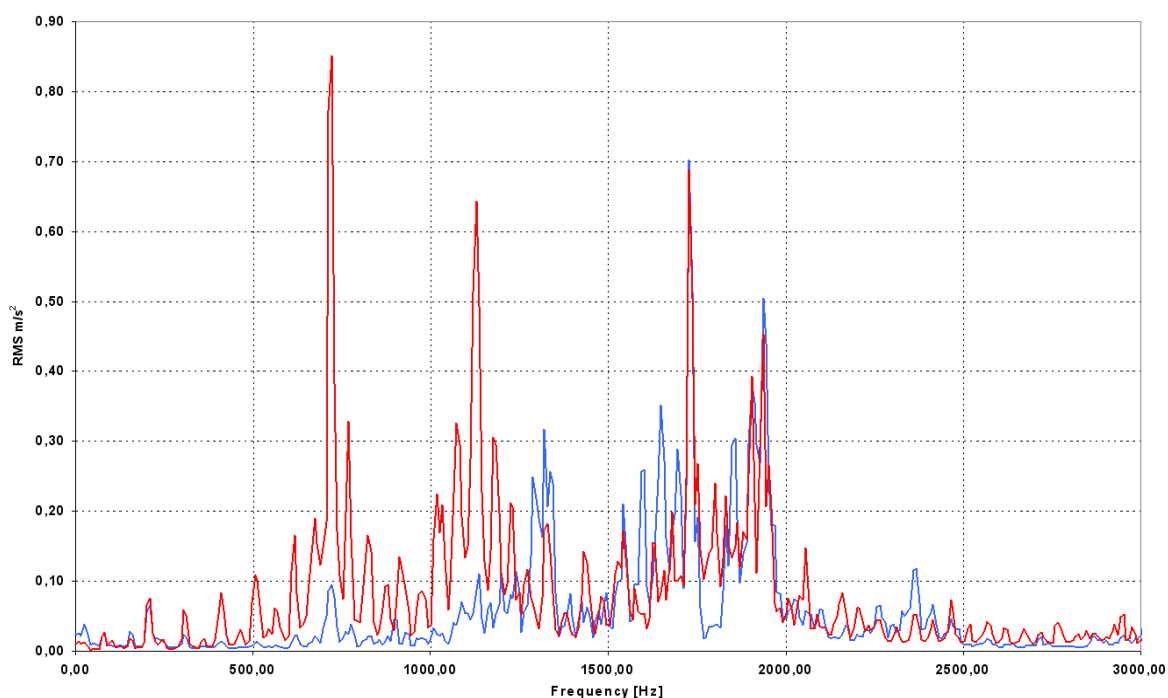
Obrázek 17 Autospektrum vibrací hlučného stroje v radiálním směru na závěsu

Při měření na podložce (obrázek č. 18) se opět vyskytuje nevyváženost na první otáčkové frekvenci 25 Hz. V oblasti od 1500 Hz do 2000 Hz jsou vidět velké vibrace, které jsou z obou stran měřeného stroje. Ze strany NDE máme maximální naměřenou hodnotu zrychlení $1,2 \text{ m.s}^{-2}$. Strana DE má v tomto případě maximum jen $0,78 \text{ m.s}^{-2}$. V těchto frekvencích dochází k rozkmitání měřeného asynchronního generátoru, které je následně i zdrojem hluku. Naměřená autospektra vibrací v radiálním směru jsou mezi sebou porovnatelná, ať už bylo měření provedené na závěsu nebo na podložce.



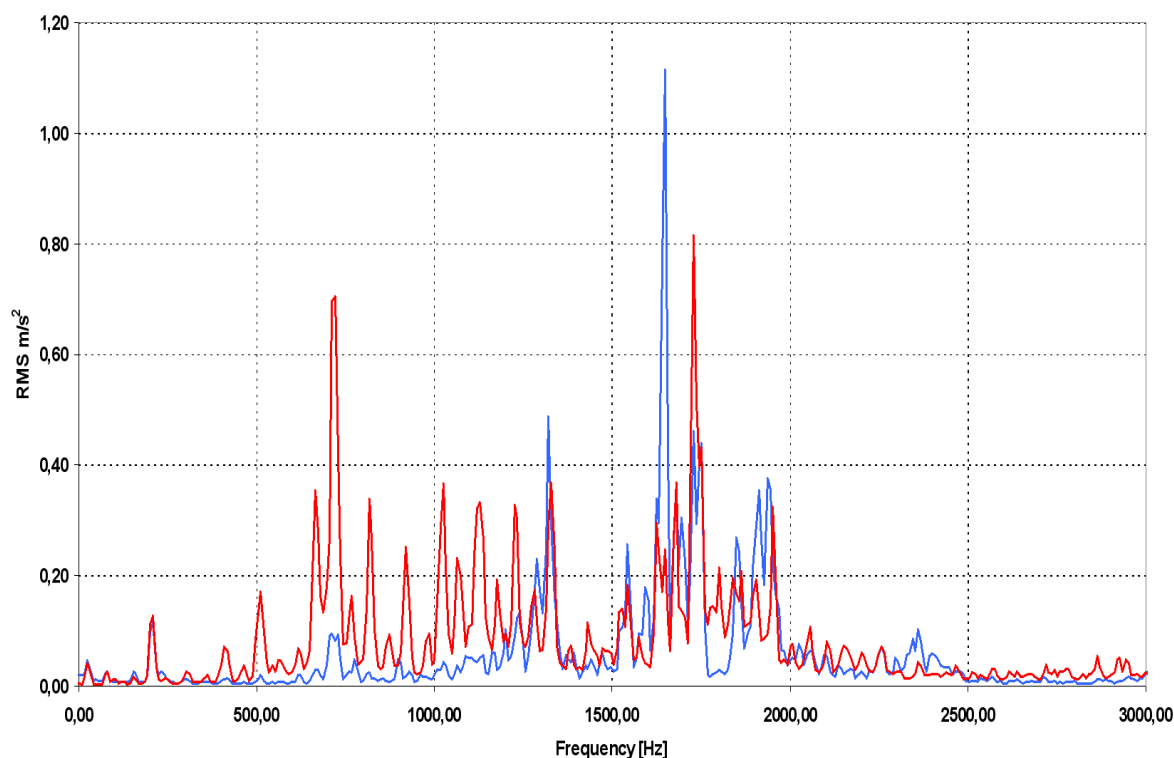
Obrázek 18 Autospektrum vibrací hlučného stroje v radiálním směru na podložce

V axiálním směru je spektrum vibrací mnohem zajímavější. Na obrázku č. 19 je nevyhovující asynchronní generátor. Modrá barva je opět snímač na straně DE, červená barva je snímač na straně NDE. Minimálně se vyskytuje na první otáčkové frekvenci nevyváženost rotoru. Ta je dominantní hlavně v radiálním směru, nicméně v tomto případě ji detekujeme i v axiálním směru. Následuje základní frekvence vnějších kroužků ložisek 80 Hz a vnitřních kroužků ložisek 120 Hz. Tyto hodnoty vibrací nepředstavují na těchto frekvencích žádný problém. Ale násobky základních frekvencí ložiskových kroužků už vykazují na některých frekvencích velké vibrace. Je vidět malé špičky vibrací na 240 a 360 Hz od ložisek, ale vše je zatím do hodnoty zrychlení $0,1 \text{ m.s}^{-2}$. Teprve na frekvenci 720 Hz se výrazně projevuje ložisko ze strany NDE. Zde se dostáváme k naměřené hodnotě zrychlení $0,85 \text{ m.s}^{-2}$. To nám způsobuje rozkmitání celého stroje v oblasti od 1500 do 2000 Hz. Opět je patrná rezonanční frekvence 1800 Hz. Toto rozkmitání v axiálním směru nám způsobuje i vibrace v radiálním směru z předchozího obrázku č. 19. Ve spektru je ještě jedna špička a to na frekvenci 1100 Hz. Hodnota zrychlení je $0,65 \text{ m.s}^{-2}$ a patří násobku vnitřního ložiskového kroužku. Spočítaná hodnota této frekvence je 1080 Hz, takže se nacházíme v oblasti tohoto ložiskového kroužku. Odchylka od spočítané frekvence je způsobená malou změnou stykového úhlu v kuličkovém ložisku a násobkem základní frekvence ložiska. Frekvence 720 Hz a k tomu příslušné vibrace patří především vnějšímu ložiskovému kroužku.



Obrázek 19 Autospektrum vibrací hlučného stroje v axiálním směru na závěsu

Další obrázek č. 20 je z měření na podložce. Modrá barva je akcelerometr na straně DE, červená barva patří akcelerometru ze strany NDE. Na průběhu grafu jsou hlavně vidět násobky základních frekvencí ložisek a to 720 Hz a 1080 Hz. Také je zde výrazné rozkmitání stroje v oblasti od 1500 Hz do 2000 Hz s maximální hodnotou $1,12 \text{ m.s}^{-2}$. I v případě měření axiálních složek na závěsu nebo na podložce máme srovnatelné výsledky, ze kterých se dá vycházet pro návrh varianty snímání vibrací pro sériovou výrobu.



Obrázek 20 Autospektrum vibrací hlučného stroje v axiálním směru na podložce

7.4 Zkušebna

Pro elektrické zkoušení výrobků je nutné zamezit přístupu nepovolaným osobám do prostoru zkušebny. U plánované varianty, kdy bude zkušebna navazovat na montáž, je nejvhodnější řešení provést oplocení prostoru zkušebny. Dveře opatřit snímačem polohy a v případě jejich otevření nebo při stisknutí STOP tlačítka odpojit celou zkušebnu od elektrického napětí. Toto tlačítko musí být umístěné u přístupových dveří na pracoviště zkoušení elektromotorů a generátorů. Pracovník v tomto případě může být na pracovišti zkušebny sám, protože ostatní pracovníci montáže jej přes oplocení vidí a mohou v případě úrazu nebo hrozícího nebezpečí zasáhnout. Stavební oddělení zkušebny od ostatní výroby pomocí např. sádkartonové příčky by umožnilo provést částečné odhlučnění a provádět měření hluku, nicméně zabezpečení provozu už by nebylo řešitelné jedním pracovníkem.

Na zkušebně vykoná pracovník nejdříve vizuální kontrolu výrobku. Po připojení konektoru a spuštění měření se automaticky provede elektrická kontrola asynchronního generátoru. Elektrické zkoušky asynchronního generátoru:

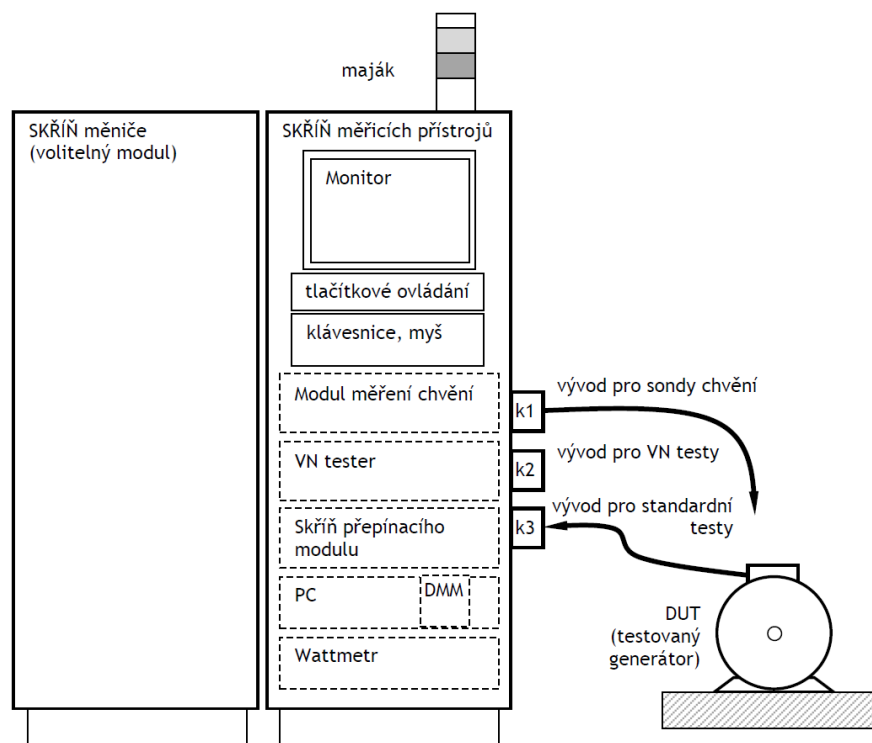
- měření izolačního odporu
- měření ohmického odporu vinutí
- zkouška elektrické odolnosti (VN test)
- měření napětí, proudu a výkonu naprázdno

Všechny měřicí přístroje musí být napojeny přes rozhraní na PC. Tím bude zajištěné okamžité ukládání naměřených dat. Jako první zkouška je měření izolačního odporu. Měření se provede pomocí multimetru a budícího stejnosměrného zdroje, když se pomocí multimetru změří procházející proud. Dále bude následovat měření ohmického odporu vinutí. U tohoto testu je použit budící zdroj proudu a měření se provede jako změření napětí pomocí multimetru. Zkouška elektrické odolnosti (VN test) se provádí testerem, který není připojen na počítač. Není tedy možné nastavení zkušebního napětí z počítače, ale musí se nastavovat přímo na měřicím přístroji. Výsledek zkoušky budou jen dva stavy, zelená (OK, v pořádku) nebo červená (NOK, stop, vadný). Protože při běžné zkoušce se měřený stroj nepřipojuje na dynamometr, provádí se měření bez zatížení, tzv. naprázdno. K tomuto měření slouží analyzátor výkonu, který má opět rozhraní pro komunikaci s počítačem.

Parametry analyzátoru výkonu:

- 3x měření napětí
- 3x měření proudu
- 3x měřicí transformátor
- napěťové a proudové vstupy

Uspořádání testovacího zařízení zkušebny je na obrázku č. 21. Je zde část určená pro měřicí přístroje a další část, která umožní případné modulární změny dle požadavku. Asynchronní generátor musí být v provozu na zkušebně minimálně 10 minut pro záběh ložisek a dostatečné rozdělení plastického maziva, které je použité pro mazání kuličkových ložisek.



Obrázek 21 Testovací zařízení zkušebny

Posouzení hlučnosti pouze poslechem je nedostačující. Nedá se to nazvat ani měřením, natož opakovatelným za daných podmínek. Vše záleží jen na schopnosti vnímání hluku a subjektivním pocitu osoby, která bude test provádět. Takový způsob vyhodnocení je pro výrobce nedostatečný. Nelze průkazně dokázat, který výrobek vyhovuje a není žádný ověřitelný záznam o provedené zkoušce.

Měření hluku a tím i posouzení hlučnosti kontrolovaného stroje by z pohledu snímačů bylo jednodušší než měření vibrací. Jednalo by se v podstatě o jeden hlukoměr, který by byl pevně upevněný na rámu, aby byla zajištěná stále stejná vzdálenost od měřených objektů. Z důvodu odhlučnění se musí vybudovat box, který se po připojení asynchronního generátoru konektorem k měřicímu testeru z obrázku č. 21 shora spustí na měřený stroj. Tento box musí mít zvukovou izolaci pro odhlučnění okolní výroby. Provedení krycího boxu musí být dvouplášťové, mezi pláště s protihlukovou izolací. Z důvodu izolace a velikosti tohoto boxu by spuštění a následné zvedání muselo být prováděné pomocí hydrauliky nebo elektromotoru s převodovkou pro přímočarý pohyb. Z hlediska bezpečnosti je možné uvést box do pohybu při spuštění dolů jen z jasně definovaného místa, odkud nehrozí zranění pracovníka pohybem boxu dolů. Stejně tak je nutné zajistit nemožnost uvedení do pohybu v případě, že pracovník zkušebny provádí připojování měřeného stroje. Tento prostor je nutné vybavit optickou závorou. Dále by bylo dobré zajistit box v horní poloze ještě případně elektromagnetickou pojistkou, která by zabránila samovolnému spuštění do dolní polohy. Tato pojistka by uvolnila box pro pohyb dolů jen po připojení napětí. Tím by bylo zajištěné, že nedojde k uvolnění protihlukového boxu při výpadku elektrické energie.

Měření vibrací je náročnější na čidla a způsob vyhodnocení. Ale při samotném průběhu měření není nutné zakrývat měřený asynchronní generátor. Odpadnou stavební a technické úpravy, které jsou nutné pro odhlučnění od ostatní výroby. U vibrací potřebujeme změřit frekvenci kmitání a pak jednu ze tří veličin – výchylku, rychlost nebo zrychlení.

Výchylku je možné měřit opticky, ale pro testování asynchronních strojů na běžné zkušebně má tato metoda několik nevýhod. Problém je se stabilním uložením, měřit v zavěšeném stavu není možné, protože tuhost takového systému by byla nedostatečná. Takové měření by nebylo opakovatelné se stejným výsledkem. Také cena těchto snímačů je podstatně vyšší než akcelerometrů.

Nejlepší variantou pro objektivní získání informací o hlučnosti zkoušených asynchronních generátorů je měření vibrací pomocí akcelerometrů. Z testovacích měření z kapitoly 7.1 a 7.2 je zcela jasná závislost hluku a vibrací. Zde je důležitá volba upevnění snímače na měřený stroj. Jakékoliv lepení na povrch měřeného asynchronního generátoru je naprosto vyloučené. Na povrchu by zůstaly špatně odstranitelné zbytky lepidla. Jako jediné možné řešení je připevnění akcelerometrů pomocí permanentních magnetů na šrouby ložiskových vík. Protože měření vibrací je možné až po zaběhání ložisek a rozdělení plastického maziva v ložiscích. Nejdříve se tedy provedou všechna elektrická měření za klidu stroje, následovat bude měření naprázdno a nakonec se přistoupí na měření vibrací. Při jednom snímání je možné zjistit jak stav ložisek, kmitání na rezonanční frekvenci, tak i případnou nevyváženost rotoru. Dále je možné jít i případně do identifikace přerušení rotorových tyčí nebo uvolněného statorového paketu. Nicméně přerušená rotorová tyč se projeví i na měření jednotlivých fázových proudů.

Použité akcelerometry by měly být trojosé, potřebuje se snímat axiální i radiální směr. Protože se jedná o rotační pohyb, tak z radiálního směru pro vyhodnocení stačí jen jedna složka. Pro sjednocení všech měření používat pro radiální složku pouze vertikální směr. Nastavení parametrů měřených hodnot je nutné provést na alespoň 20 ks vyhovujících a 20 ks nevyhovujících generátorech. Z předchozích testů se dá předběžně nastavit hodnota vibrací do $0,4 \text{ m.s}^{-2}$ v oblasti do 2000 Hz, která by byla hraniční hodnotou. Ale pokud by se měla kontrolovat i případná nevyváženost rotoru, tak je nutné rozdělení do několika frekvenčních pásem. První pásmo nastavit na frekvenci 25 Hz a testovat nevyváženost rotoru do maximální hodnoty $0,25 \text{ m.s}^{-2}$. Další pásmo zvolit na ložiskové frekvence a na jejich násobky. Toto frekvenční pásmo nastavit v rozmezí od 50 Hz do 1500 Hz na maximální hodnotu vibrací $0,4 \text{ m.s}^{-2}$. Třetí pásmo je vhodné nastavit v oblasti rezonanční frekvence od 1500 Hz do 2000 Hz s maximální hodnotou vibrací $0,2 \text{ m.s}^{-2}$. Při překročení kterékoliv hodnoty vyhodnotit zkoušený generátor jako nevyhovující. Po změření vybraného vzorku strojů provést vyhodnocení a případně udělat korekci ve zvolené hodnotě a frekvenci. Alespoň u tří kusů vzorků je účelné namontovat záměrně špatně vyvážené rotory. Je to z důvodu přesnějšího nastavení maximální hodnoty vibrací na 25 Hz pro nevyváženost rotoru.

Pro měření vibrací je potřeba na zkušebně vytvořit zvedací zařízení, aby zkoušení bylo možné provádět v zavěšeném stavu. Dojde tím k oddělení od montážního pásu a splnění požadavku normy na měření v zavěšeném stavu. Pokud zkoušený stroj zůstane s montážní paletou na dopravníku, bude při měření docházet k rušivým vibracím z montáže. Také samotné části dopravníku mohou být zdrojem nežádoucích parazitních vibrací.

8 Závěr

Výrobu asynchronního generátoru je výhodné rozdělit na mechanickou část, kde se bude vyrábět kompletní vyvážený rotor včetně všech jeho vstupních dílů, ložiskové štíty a ložisková víka. Některé z těchto komponent je možné řešit nákupem hotových dílů. Nakoupené komponenty pak nemusí být převáženy do skladu, výhodná je jejich přímá manipulace na pracovišti montáže. Při vlastní výrobě ložiskových vík je nutné vytvoření malého meziskladu pro vyrobené kusy. Další část by byla výroba vinutí a kompletního navinutého statoru, kde na sebe navazují jednotlivé výrobní operace. Umístění montáže do budovy U18 vedle navíjení statorových paketů má výhodu v návaznosti na zhotovení kompletního navinutého statoru a začátku montážní linky. Na tomto místě jsou i krátké logistické cesty pro manipulaci s materiálem a nedochází k jejich křížení. Na konci montážní linky je ještě prostor pro zkoušení vyrobených asynchronních generátorů.

Volba třetí varianty montáže a k tomu navazující zkušebny je nejvhodnější z důvodu otevřenosti systému pro další podobné produkty. Je to dané dostatečným prostorem kolem montáže, kde je možnost navážet i komponenty pro jiné typy strojů. Volbou vhodné velikosti výrobní (montážní) dávky volit změnu sortimentu nejdříve po směnách. Je to z důvodu logistického, aby nebylo nutné v průběhu jedné směny navážet a případně skladovat na montáži komponenty na různé výrobky. Předěje se tím problémům s hledáním komponent, případně s jejich záměnou.

Měření vibrací při kusové zkoušce dává dostatek informací o stavu měřeného stroje. Ověří se vyvážení, stav ložisek a z oblasti rezonanční frekvence i hlučnost. Při případné reklamaci např. na vibrace vlivem nevyváženosti v kompletně smontovaném zařízení dle obrázku č. 1, je možné se hájit frekvenční charakteristikou z oblasti první otáčkové frekvence.

Provedené testy s měřením vibrací je nutné ještě opakovat přímo na nově vybudovaném místě zkušebny. Zjistit tak případné parazitní vibrace a dokázat je odfiltrovat. V praxi se diagnostikují stroje, kde průběh vibrací je podle vanové křivky. Po záběhu vibrace klesnou a celou dobu životnosti se drží na nižší hodnotě, než jsou u nového výrobku. Teprve před koncem životnosti se začnou vibrace zvyšovat a je možné stanovit termín výměny. V tomto případě je nutné si uvědomit, že se na vibrace testuje zařízení, které má nová ložiska, jež ještě nejsou zaběhaná. Jedná se o testování asynchronních generátorů na hlučnost, která je způsobená vibracemi. Tyto vibrace vybudí otáčející se ložiska za provozu. U každého takto zkoušeného nového stroje bude hodnota naměřených vibrací jiná. Můžeme stanovit pouze maximální hodnotu, která bude nastavená podle již provedených předběžných testovacích měření. Při opětovném změření, tentokrát ale v provozu a po zaběhnutí ložisek, se můžeme dostat na nižší hodnoty vibrací. Ale takové měření by bylo zase ovlivněné jiným upevněním asynchronního generátoru než na zkušebně a také vibracemi celého systému. Z pohledu diagnostiky by bylo zajímavé, kdyby byla možnost na několika kompletních strojích, měření jejich vibrací za provozu v průběhu celé životnosti výrobku.

Literatura

- [1] ZIEGLER, J. - HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*, vydala VŠB – Technická universita Ostrava 2005, 178 str., dotisk 1. vydání, ISBN 80 – 248 – 0650 – 9
- [2] Tůma, J.: *Diagnostika strojů*, vydala VŠB – Technická universita Ostrava 2009, 138 str., 1. vydání, ISBN 978-80-248-2116-0
- [3] SCHAEFFLER GROUP: *Rolling bearings*, vydal Schaeffler KG 2006
- [4] SKF: *Katalog 6000 CS*, vydal SKF Group 2007

Seznam příloh

Příloha A: *Budova U17, stávající stav, číslo výkresu: DP-2011-1700*

Příloha B: *Budova U18, stávající stav, číslo výkresu: DP-2011-1800*

Příloha C: *Budova U18, varianta 1, číslo výkresu: DP-2011-1801*

Příloha D: *Budova U18, varianta 2, číslo výkresu: DP-2011-1802*

Příloha E: *Budova U18, varianta 3, číslo výkresu: DP-2011-1803*